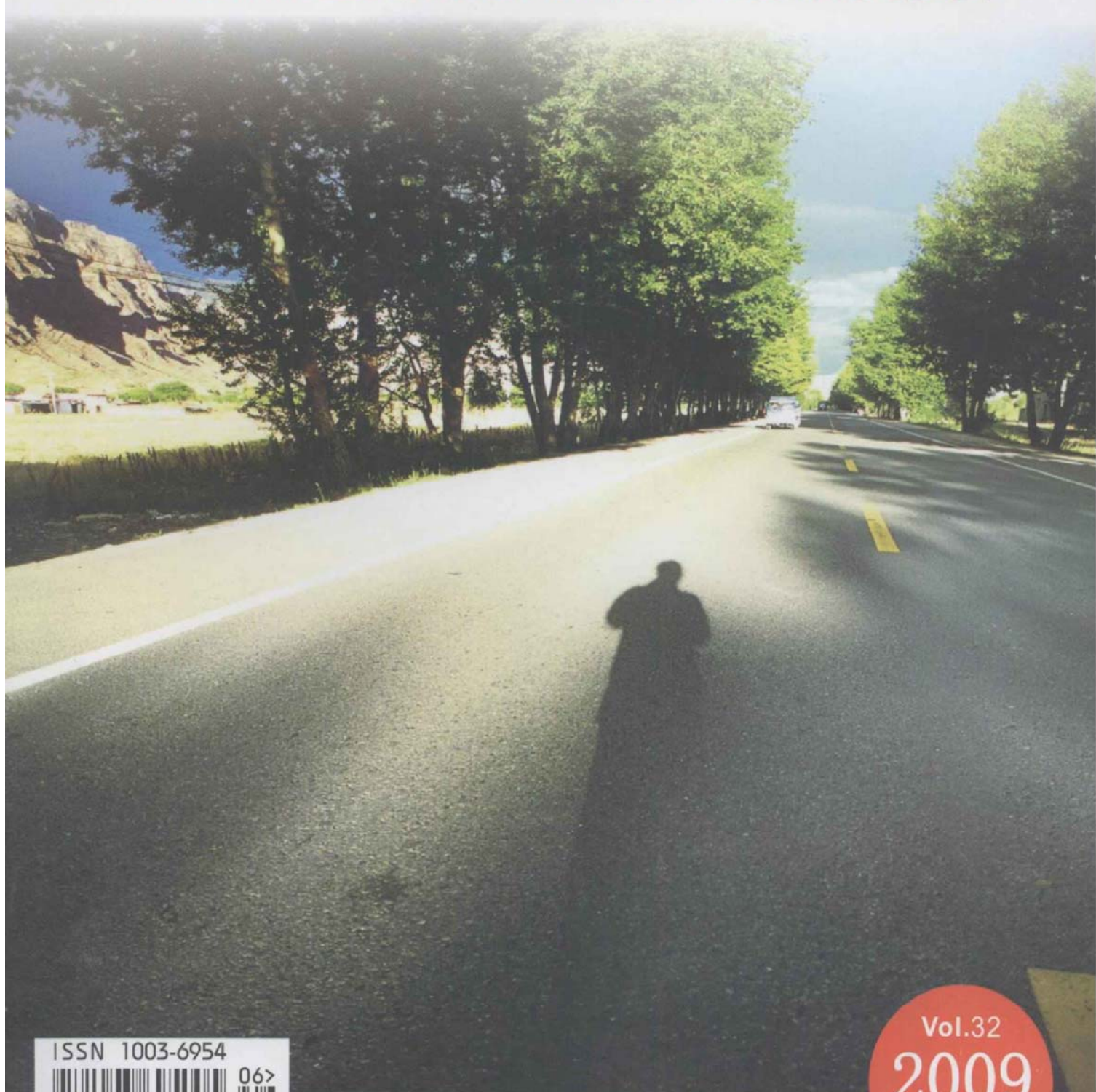


四川電力技術

SICHUAN ELECTRIC POWER TECHNOLOGY



ISSN 1003-6954

06>



四川省电机工程学会 四川电力试验研究院

Vol.32

2009

No.3

《四川电力技术》 编辑委员会名单

主任委员 王 平

副主任委员 张晓明

刘俊勇

委 员

(按姓氏笔划为序)

方文弟 王 卓 白家棣

刘 勇 朱白桦 朱国俊

朱 康 邓亚军 鄢小端

李建明 严 平 胡 灿

徐 波 唐茂林 谢 舫

甄 威 滕福生

秘 书 李世平

吴小冬

四川电力技术

双月刊 1978年创刊

刊号: ISSN1003-6954
CN51-1315/TM

2009年第32卷第3期(总200期)

主管单位:四川省电力公司

主办单位:四川省电机工程学会

四川电力试验研究院

发行范围:公开

主 编:朱 康

副 主 编:谢 舫 吴小冬

编辑出版:《四川电力技术》编辑部

发 行:四川电力试验研究院情报室

地 址:成都市青华路24号

邮政编码:610072 电话:(028)87082037

传 真:(028)87314278

E-mail:cdscdljs@163.com

E-mail:wxd_zss@sepe.com.cn

印 刷:四川明源印务有限责任公司

封面设计:成都宏泰广告有限公司

国内定价:每册6.00元

[期刊基本参数] CN51-1315/TM * 1978 *

b * A4 * 96 * zh * P * ¥6.00 * 8000 * 28 *

2009-03

目 次

· 基金栏目 ·

交流系统强度与所联直流输电系统换相失败关系研究

..... 艾 飞 李兴源 王晓丽 等(1)

考虑负荷静特性的基于奇异值分解法静态电压稳定分析

..... 吴华坚 李兴源 贺 洋 等(5)

基于 HHT 的电力系统负荷预测..... 白玮莉 刘志刚 王 奇 等(9)

新息图法电力系统不良数据检测与辨识..... 张永超 黄彦全 宋廷珍 等(14)

风电场短期风速的改进 Volterra 自适应预测法

..... 罗海洋 刘天琪 李兴源(16)

异步风力发电机稳态模型研究..... 顾 威 李兴源 魏 巍(20)

基于 pscad 变桨距风力发电系统的建模仿真

..... 张 尧 王维庆 李 锋 等(25)

· 高电压技术 ·

黑启动过程中操作过电压分析..... 刘连志 赵 灿 韩振明(28)

输电线路雷电干扰暂态识别的仿真研究..... 张丽娜 陈 皓(31)

6~35 kV 配电网铁磁谐振对策初探..... 程德蓉 刘启俊(36)

超高压输电线路绝缘子的可靠性评价..... 蓝健均 李大勇(39)

一种无锁相环的单相电路谐波和无功电流检测方法..... 周 波(41)

线路带负荷测试标准化作业卡的编制与运用..... 何仕卿(44)

变压器出口短路的危害及预防措施..... 徐克华(45)

变压器绕组变形监测的研究现状综述..... 诸 兵 曾雪梅 黄晓艳(48)

GIS 设备选型应注意的问题..... 张华强 季 枫 肖 伟(54)

· 自动与保护 ·

自适应遗传-禁忌搜索混合算法在 PMU 最优配置中的应用

..... 李新振 滕 欢(56)

电力系统微机保护技术前瞻..... 刘 柳(61)

微机备自投装置应用中的一些问题分析..... 唐利兵(64)

浅谈数字化变电站电气二次架构设计..... 江熙珍(68)

基于移动数据库技术的 GPS 电力线路巡视管理系统..... 熊 勇 余 宁(71)

智能路由多层交换机在变电站自动化系统中的应用..... 冯世林(73)

· 事故分析 ·

电流互感器典型故障案例分析..... 钟守熙(77)

架空输电线路复合绝缘子掉串原因分析及对策..... 李龙江(79)

油纸套管绝缘介质老化诊断分析..... 白 斌(82)

· 发电技术 ·

C12-8.83/3.82 型汽轮机组负胀差超限原因分析及处理..... 任 宏(86)

水电厂球阀前压力钢管连接明段的安全评价..... 张宏雁 唐 杰 周 松(89)

600 MW 氢冷发电机漏氢处理及预防措施..... 袁 廷(93)

封面照片由曾逸农提供

本期责任编辑 刘坤才 编辑 吴小冬 刘学昌 程文婷

CONTENTS

Research on Relationship of Commutation Failures between AC System Strength and Related DC Transmission System	Ai Fei Li Xingyuan Wang Xiaoli etc. (1)
Application of Singular Value Decomposition Method to Static Voltage Stability Analysis Considering Static Load Model	Wu Huajian Li Xingyuan He Yang etc. (5)
Load Forecasting of Power System Based on HHT	Bai Weili Liu Zhigang Wang Qi etc. (9)
Bad Data Detection and Identification Based on Innovation Graph	Zhang Yongchan Huang Yanquan Song Tingzhen etc. (14)
Short-term Wind Speed Forecasting in Wind Farms Using Volterra Adaptive Filter	Luo Haiyang Liu Tianqi Li Xingyuan etc. (16)
Research on Steady-state PQ Model of Asynchronous Wind Generator	Gu Wei Li Xingyuan Wei Wei (20)
PSCAD-based Modeling and Simulation of Variable Pitch Wind Power System	Zhang Yao Wang Weiqing Li Feng etc. (25)
Analysis of Switching Overvoltage in Black-start	Liu Lianzhi Zhao Can Han Zhenming (28)
Simulation Research on Transient Identification of Lightning Interference on Transmission Lines	Zhang Lina Chen Hao (31)
Superficial Discussion on Countermeasures of Removing Ferromagnetic Resonance in 6~35 kV Distribution Network	Cheng Derong Liu Qijun (36)
Reliability Evaluation of EHV Transmission Line Insulator	Lan Jianjun Li Dayong (39)
Detection Method without Phase-locked Loop for Single-phase Circuit Harmonic and Reactive Current	Zhou Bo (41)
Preparation and Application of Standardized Operation Card for On-load Test of Transmission Line	He Shiqing (44)
The Harm of Transformer Outlet Short-circuit and Its Precautionary Measure	Xu Kehua (45)
Research Status of Transformer Winding Deformation Monitoring	Zhu Bing Zeng Xuemei Huang Xiaoyan (48)
Selection Issues for GIS Equipment	Zhang Huaqiang Ji Feng Xiao Wei (54)
Application of Hybrid Adaptive Genetic Algorithm-Tabu Search to Optimal PMU Placement	Li Xinzhen Teng Huan (56)
Prospects of Computer-based Protection Technology in Power System	Liu Liu (61)
Problem Analysis in Application of Computer-based Reserve Power Supply Automatic Connection Device	Tang Libing (64)
Superficial Discussion on Design of Electrical Secondary Architecture of Digital Substation	Wang Xizhen (68)
Line Inspection Management System Based on Mobile Database and GPS	Xiong Yong Yu Ning (71)
Application of Intelligent Multilayer Routing Switch to Substation Automation System	Feng Shilin (73)
Analysis on Typical Failures of Current Transformer	Zhong Shouxi (77)
Cause Analysis of Composite Insulator String Dropping in Overhead Transmission Lines and Its Countermeasures	Li Longjiang (79)
Diagnosis and Analysis of Insulating Medium Ageing of Oiled Paper Bushing	Bai Bin (82)
Cause Analysis on Negative Differential Expansion Overreaching of C12-8.83/3.82 Type Steam Turbine and Its Treatment	Ren Hong (86)
Safety Assessment of Unburied Penstock in Front of Globe Valve in Hydroelectric Power Plant	Zhang Hongyan Tang Jie Zhou Song (89)
Hydrogen Leakage Treatment of 600 MW Hydrogen-cooling Generator and Its Precautionary Measure	Yuan Ting (93)

SICHUAN ELECTRIC POWER
TECHNOLOGY

2009 Vol. 32 No. 3

(Ser. No. 200)

Bimonthly, Started in 1978

Sponsor:

Sichuan Society of Electrical Engineering

Sichuan Test and Research Institute of Electrical Power

Editor & Publisher:

Editorial Department of SICHUAN ELECTRIC POWER
TECHNOLOGY

Address: Qingyanggong, Chengdu, Sichuan, China

Postcode: 610072

交流系统强度与所联直流输电系统换相失败关系研究

艾 飞¹, 李兴源¹, 王晓丽², 任永生³, 韦 立⁴, 刘 建¹

(1. 四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065; 2. 杭州余杭供电局, 浙江 杭州 311100;

3. 杭州萧山供电局, 浙江 杭州 311200; 4. 重庆綦南供电局, 重庆 400000)

摘 要:从换相失败的本质原因出发, 研究不同短路比对 CIGRE HVDC 模型换相过程的影响。研究表明, 增大交流系统强度可减小系统波动, 加速系统的恢复过程。在 CIGRE HVDC 模型的基础上, 建立双馈入直流输电系统, 探讨故障及非故障交流系统强度对多馈入直流输电系统同时换相失败的影响。计算结果表明, 增大非故障交流系统强度有利于避免同时换相失败, 而增大故障交流系统强度对于避免同时换相失败基本无效。

关键词:换相失败; CIGRE HVDC 模型; 短路比 (SCR); 多馈入直流输电系统 (MIDC); 同时换相失败

Abstract: Based on the essential reason of commutation failure, the commutation conditions of CIGRE HVDC model under different short circuit ratios (SCRs) are studied. The results show that strengthening the AC system could reduce the system disturbance and accelerate the recovery process. Based on CIGRE HVDC model, a dual-feed HVDC system is established to explore the influence of faulted and non-faulted AC system strength on simultaneous commutation failures of MIDC. The calculation results show that strengthening the non-faulted AC system is beneficial to avoiding simultaneous commutation failures while strengthening the faulted AC system has little effect on avoiding simultaneous commutation failures.

Key words: commutation failure; CIGRE HVDC model; short circuit ratio (SCR); multi-feed HVDC (MIDC); simultaneous commutation failures

中图分类号: TM732 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)03-0001-04

直流输电是目前世界发达国家作为解决高电压、大容量、长距离送电和异步联网的重要手段^[1~3], 但高压直流输电系统的投入在带来各种好处的同时也引进了新的问题, 换相失败就是换流站采用晶闸管作为换流阀元件所面临的常见故障之一^[4,5]。换相失败与很多因素有关, 主要有换流母线电压、直流电流、换相电抗、越前触发角、不对称故障时换相电压的过零点相位移、换流阀的触发脉冲控制方式、交流系统的频谱特性和所联交流系统强度等^[6~8]。文献[6]以 CIGRE HVDC 标准模型为研究对象比较详细地分析了上述部分因素对逆变器换相失败的影响, 得出了逆变器发生换相失败的一般规律, 但没有分析交流系统强度对换相失败的影响。文献[9]对一个联于弱交流系统的直流输电系统的动态特性及换相失败进行了仿真, 没有对交流系统强度如何影响直流系统换相失败进行定性或定量分析。文献[10]针对一个两端直流输电系统分析了不同交流系统强度情况下, 所研究系统换相失败及直流电压、直流电流、交流电压

等的恢复情况, 讨论了交流系统强度对所联 HVDC 系统故障恢复特性的影响。

这里以 CIGRE HVDC 为基本模型, 研究了不同交流系统强度下换相失败的动态情况。并在 CIGRE HVDC 的基础上构建了一双馈入直流输电系统, 在相同故障而不同短路比的情况下, 利用 PSCAD/EMTDC 软件中的连续仿真功能, 求出导致两逆变器同时发生换相失败的临界电抗的值, 来初步研究多馈入系统中交流系统强度与同时换相失败的关系。

1 换相失败的机理

换相失败是指在换相电压反向 (具有足够的去游离度) 之前未能完成换相的故障^[11]。换流器的阀是一种可控电力电子开关, 它需要一定时间完成载流子复合, 恢复正向阻断能力。一般地, 晶闸管的恢复时间以电角度 γ_{min} 表示, 当晶闸管的换相余裕角小于 γ_{min} 时, 换流器就换相失败, 一般取为 7° ^[8,12]。直流输电系统的大部分换相失败发生在逆变器。

基金项目:国家自然科学基金资助项目 (50595412); 国家重点基础研究专项经费项目 (2004CB217901); 国家科技支撑计划项目 (2008BAA13B01)

2 短路比及其相关问题

电力系统中各种元件的性能由其所处网络特性尤其是系统强弱决定。系统的强弱反映了系统内组成元件对各种扰动的敏感度。强电力系统对负荷变化扰动不会有显著的电压或功角变化,但是弱电力系统对一个小扰动都会有巨大的电压或其他量的偏移,将会对系统产生危害。因此,换流母线处的短路容量或等值阻抗通常是在该点处衡量系统强弱的很好的指标。传统上,利用指标“短路比”(short circuit ratio, SCR, 其值表示为 S_{CR})来衡量单馈入换流站的母线特性^[13]。

$$S_{CR} = \frac{S_{SC}}{P_{dN}}$$

(1)

式中, S_{SC} 为换流母线处的短路容量, P_{dN} 为换流站的额定直流功率。以 HVDC 换流站的额定直流功率和换流母线的交流电压为基准时,式 (1)可表示为

$$S_{CR} = \frac{1}{Z_L}$$

(2)

式中, Z_L 是交流系统阻抗的标么值。短路比越小系统越弱,反之越强。系统的强弱与稳定性直接相关,系统越强则越稳定,反之不稳定。

多馈入系统中各直流子系统传输功率不同,因此需对短路比重新定义。文献 [14]提出用基准功率比(power base ratio, PBR)来描述系统短路比的方法。子系统 i 的短路比可表示为:

$$M_{SCRi} = \frac{1}{R_{PBi}} \cdot \frac{1}{Z_i}$$

(3)

式中, $R_{PBi} = P_{dNi} / P_{dNj}$ 即选定某个子系统 j 的直流传输功率 P_{dNj} 为 MDC 系统直流功率基准值,计算子系统 i 的基准功率比; Z_i 为以子系统 j 的直流传输功率 P_{dNj} 和换流母线的交流电压为基准时子系统 i 的阻抗标么值。

3 两端直流输电系统研究

3.1 仿真系统模型

这里以 PSCAD/EMTDC^[15]为仿真工具,采用 CIGRE HVDC^[16]为仿真模型。其逆变侧短路比 $S_{CR} = 2.5$,换流母线额定电压为 230 kV。由短路比的概念知,改变交流系统的阻抗就可以改变系统的短路比,

并分析当逆变侧分别为 2.0、2.5、4.0 时系统的动态特性。

3.2 仿真结果及分析

设定仿真中系统的运行时间为 8.0 s。3.0 s 时换流母线发生三相接地故障,0.1 s 后故障切除。以下各图是 S_{CR} 分别为 2.0、2.5、4.0 时系统的动态仿真结果。从图 1 中可以看出, S_{CR} 为 2.0 也就是交流系统很弱时,系统反应强烈,故障发生时逆变侧直流电压、电流冲击幅值较大,扰动后的振荡也比较明显,系统发生了换相失败,且不能够顺利恢复。图 2 中 S_{CR} 为 2.5 时故障对系统的冲击不大,在故障切除后系统能够较快速从换相失败恢复,并达到故障前的稳定状态。图 3 中 S_{CR} 为 4.0 时,系统在故障切除后立即从换相失败中恢复,较 S_{CR} 为 2.5 时迅速。

4 多馈入直流输电系统研究

4.1 系统模型

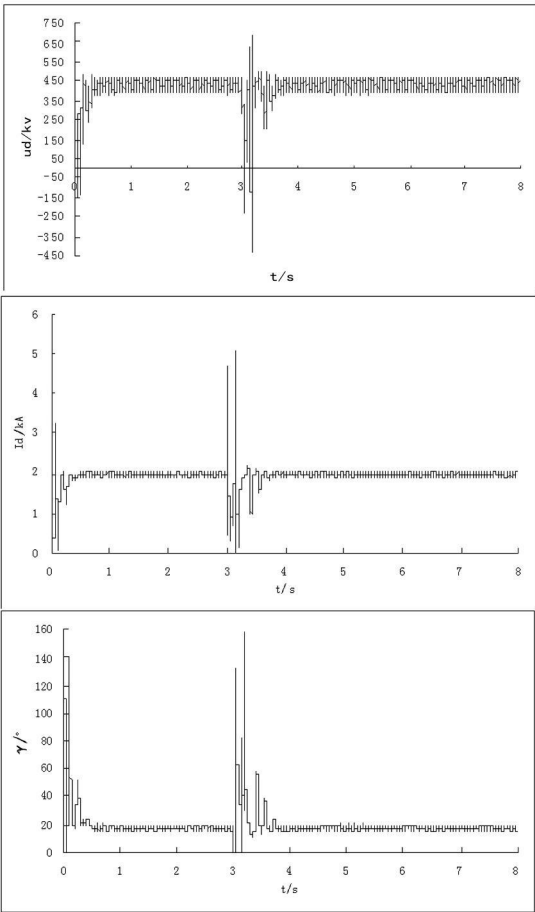


图 1 短路比为 2.0 时系统的动态特性

在 CIGRE HVDC 标准测试系统模型的基础上建立双馈入直流输电系统,其接线如图 4 所示,两直流

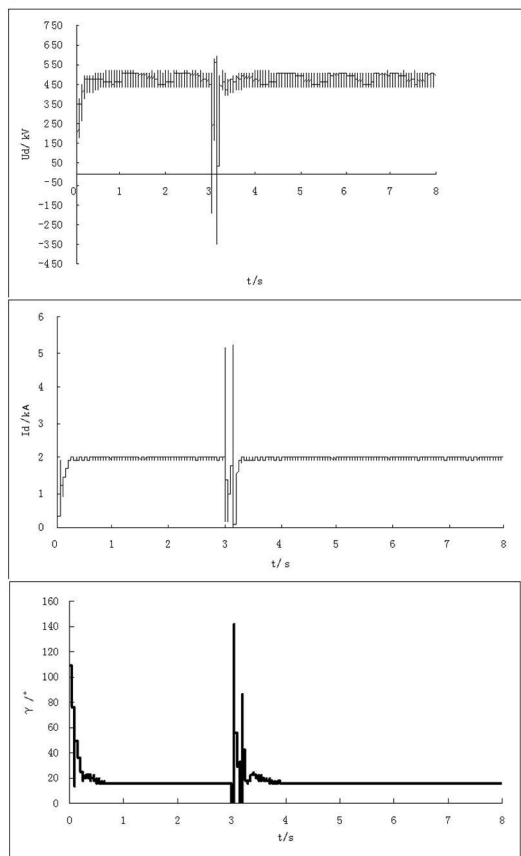


图 2 短路比为 2.5 时系统的动态特性

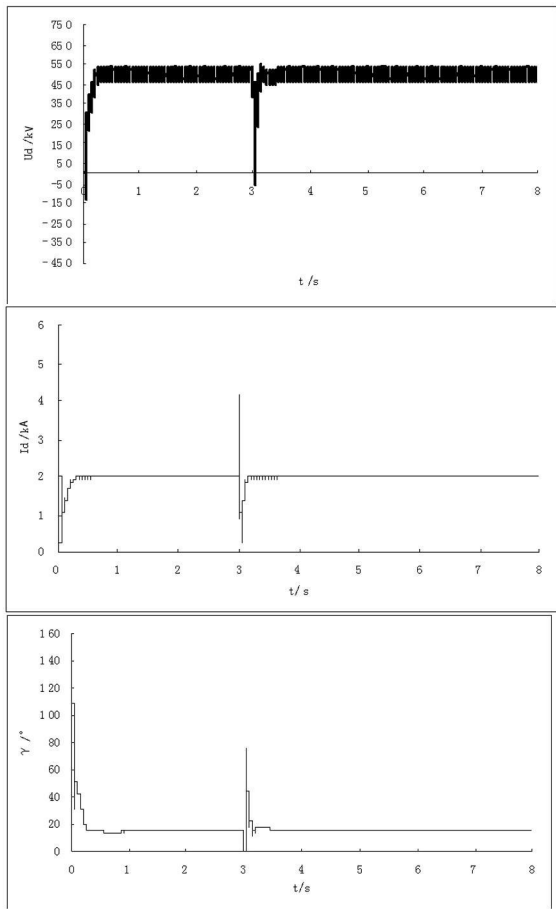


图 3 短路比为 4.0 时系统的动态特性

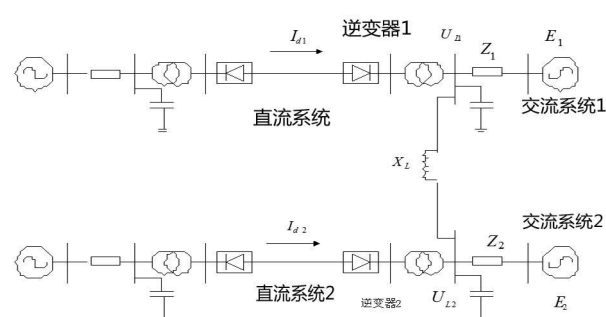


图 4 双馈入系统接线图

系统在逆变端通过相互间的耦合电抗关联。

以图 4 中逆变站 2 为例，逆变站 2 的换相电压可由下式表示：

$$U_{L2} = [\frac{E_2}{Z_2} + \frac{U_{L1}}{X_L} + \frac{\sqrt{6}}{\pi} \cdot I_{d2}] \cdot [\frac{1}{Z_2} + \frac{1}{X_L}]^{-1} \tag{4}$$

其熄弧角模型为：

$$\begin{aligned} \gamma_2 &= \arccos [\frac{\sqrt{2n_2} I_{d2} X_2}{U_{L2}} + \cos \beta_2] \\ &= \arccos [\sqrt{2n_2} I_{d2} X_2 [\frac{E_2}{Z_2} + \frac{U_{L1}}{X_L} + \frac{\sqrt{6}}{\pi} \cdot I_{d2}]^{-1} \cdot [\frac{1}{Z_2} + \frac{1}{X_L}] + \cos \beta_2] \end{aligned} \tag{5}$$

当熄弧角 γ_2 小于 7° 时，就认为逆变器发生换相失败。

4.2 仿真方案

多馈入直流输电系统中多个换流站是否同时发生换相失败与各子系统间的电气联系密切相关。当各直流子系统交流母线间的电气联系较强时，某一子系统的交流侧电压或无功功率的波动会影响邻近交流母线电压，则可能导致多个换流器同时或相继换相失败。对于相互关联的两个直流子系统来说，当一个子系统故障导致其逆变器换相失败时，存在一个临界的耦合阻抗，使得另一个直流子系统刚好同时发生换相失败。这样，当系统间电气距离大于这个临界值时，两逆变站间的电气联系相对较弱，一个直流子系统故障不足以引起另一个直流子系统的换相失败；当两系统间电气距离小于这个临界值时，两系统同时发生换相失败。

在相同故障而不同短路比的情况下，利用 PSCAD /EMTDC 软件中的连续仿真功能，求出导致两逆变器同时发生换相失败的临界电抗的值 (以 X_{LC} 表示)，来初步探讨多馈入系统中短路比与换相失败的关系。

4.3 仿真结果分析

方案 1: 逆变站 1 换流母线发生三相金属性接地故障, 使得换流母线电压下降为零, 此时逆变站 1 必定发生换相失败。改变逆变器 2 交流侧阻抗的值以改变其交流系统强度, 求出在不同短路比情况下两逆变器同时换相失败的临界耦合电抗。电抗以子系统 1 的直流传输功率 P_{dn1} 和换流母线的额定电压为基准: $Z_B = \frac{V_{ac}^2}{P_{dn}} = 52.9 \Omega$ 。

仿真计算结果如表 1 所示。

表 1 M_{SCR1} 固定时 X_{LC} (pu) 随 M_{SCR2} 的变化

$M_{SCR1} = 2.5$						
M_{SCR2}	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0
X_{LC} (pu)	8.7	6.9	5.6	4.5	3.7	3.1

从表中可以看出, 随着 M_{SCR2} 的增大, 避免同时换相失败所需的耦合电气距离减小, 两直流系统可以在近电气距离安全运行。从表中也可以看出, 增大 M_{SCR2} 避免同时换相失败的效果是明显的: M_{SCR2} 从 2.5 增加到 5.0 时, 临界电抗从 8.7 pu 下降到 3.1 pu, 可以得出结论: 增大非故障交流系统的强度有利于避免同时换相失败。这对于多馈入直流输电系统的设计和运行具有重要意义。

方案 2: 逆变站 1 换流母线发生三相金属性接地故障, 使得换流母线电压下降为零, 此时逆变站 1 必定发生换相失败。改变逆变站 1 交流侧阻抗以改变其交流系统强度, 求出在不同短路比情况下两逆变器同时换相失败的临界耦合电抗。同方案 1, 基准阻抗为 $Z_B = \frac{V_{ac}^2}{P_{dn}} = 52.9 \Omega$ 。

仿真计算结果如表 2 所示。

表 2 M_{SCR2} 固定时 X_{LC} (pu) 随 M_{SCR1} 的变化

$M_{SCR2} = 2.5$						
M_{SCR1}	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0
X_{LC} (pu)	8.7	9.9	9.9	9.7	9.7	9.8

从表中可以看出, 随着 M_{SCR1} 的增大, 临界电抗变化不规律, 它没有随着 M_{SCR1} 的增大而减小, 可以说明: 增大故障交流系统的强度对于避免同时换相失败基本无效。

5 结 论

通过仿真分析及计算讨论了交流系统强度与所联直流输电系统换相失败的关系, 得出如下结论。

(1) 两端直流输电系统中, 故障情况下, 弱受端

系统会延缓整个系统的恢复过程, 甚至导致后续的换相失败。减小逆变侧交流系统阻抗即增大交流系统强度可减小系统波动, 加速系统的恢复过程。

(2) 多馈入直流输电系统中, 当系统其他参数一定时, 增大非故障交流系统强度有利于避免同时换相失败, 而增大故障交流系统强度对于避免同时换相失败基本无效。

在系统设计阶段, 可以通过仿真分析及计算求出避免换相失败所需的交流系统参数, 这样可以在一次设备设计阶段选出有利于系统换相的设备, 对于实际系统的设计和运行具有重要意义。

参考文献

[1] 管秀鹏, 孙元章, 赵国梁, 等. 南方电网西电东送暂态功率传输极限研究 [J]. 电网技术, 2004, 28(2): 1—5.

[2] 李峰, 管霖, 钟杰峰, 等. 广东交直流混合电网的运行稳定性研究 [J]. 电网技术, 2005, 29(11): 1—4.

[3] 周孝信. 我国电网技术的现状与未来 [J]. 电网技术, 1995, 19(2): 1—4.

[4] 吴冲, 李兴源, 黄宗君. 高压直流输电系统换相失败及其相关问题研究 [J]. 现代电力, 2007, 24(3): 1—5.

[5] 郝跃东, 倪汝冰. HVDC 换相失败影响因素分析 [J]. 高电压技术, 2006, 32(9): 38—41.

[6] 欧开健, 任震, 荆勇. 直流输电系统换相失败的研究 (一)——换相失败的影响因素分析 [J]. 电力自动化设备, 2003, 23(5): 5—8.

[7] Kristmundsson G M, Carroll D P. The effect of system frequency spectrum on commutation failure in HVDC inverter [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1990, 5(2): 1121—1128.

[8] 荆勇, 欧开健, 任震. 交流单相故障对高压直流输电换相失败的影响 [J]. 高电压技术, 2004, 30(3): 60—62.

[9] 黎敬霞, 王肩雷, 钱晶, 等. 联于弱交流系统的 HVDC 换相失败研究 [J]. 昆明理工大学学报 (理工版), 2006, 31(2): 48—52.

[10] 魏星. 交流系统强度对 HVDC 故障恢复特性影响的仿真分析 [J]. 电力科学与工程, 2007, 23(3): 24—26.

[11] 李兴源. 高压直流输电系统的运行和控制 [M]. 北京: 科学出版社, 1998.

[12] 荆勇, 任震, 欧开健. 天广直流输电系统换相失败的研究 [J]. 继电器, 2003, 31(10): 32—36.

[13] Paulo Fischer de Toledo, Bemt Bergdahl, Gunnar Asplund. 多馈入 HVDC 交直流混合系统短路比的定义和应用 [J]. 南方电网技术研究, 2005, 11(6): 24—29.

(下转第 35 页)

表 2 两种雷击情况不同条件下的仿真结果

类型	条件		E _a	E _{d1}	E _{d2}	E _{d3}	E _{d4}	E _{d5}
直击雷	故障性 30 kA	200 km	98.961 4	0.128 3	0.255 9	0.381 2	0.170 4	0.102 7
		150 km	99.188 6	0.092 4	0.186 3	0.355 1	0.114 4	0.063 3
		50 km	99.392 9	0.068 5	0.143 7	0.234 4	0.096 2	0.064 3
	非故障性 15 kA	200 km	45.403 3	9.432 3	14.019 2	16.778 4	9.96	4.406 7
		150 km	37.041 6	9.784 8	16.701 2	19.052 9	11.432 4	5.987 1
		50 km	47.392 2	7.470 5	14.093 9	16.341 3	9.43	5.272 1
感应雷	非故障性 5 kA	200 km	60.593 2	4.653 4	7.330 3	10.295 1	10.524 4	6.603 6
		150 km	57.637 2	4.395 1	7.619 2	11.966 3	10.966 3	7.800 2
		50 km	59.956 4	4.657 8	7.026 8	12.213 3	7.531 7	8.614 0

首先介绍了雷电流的波形,并利用 MATLAB 软件构建雷电流和输电线路仿真模型,通过参数的设定,对四种常见的普通短路和两种形式的雷击进行仿真实验。由仿真的数据和波形可以明显看出普通短路与雷电干扰及故障性雷击的区别,实现了输电线路雷电干扰暂态的识别方法,大量的仿真数据说明了该方法的可靠性和可行性。

参考文献

[1] 钟麟,王峰. MATLAB 仿真技术与应用教程 [M]. 国防工业出版社, 2004. 1.

[2] 施围,邱毓,等. 高电压工程基础 [M]. 机械工业出版社, 2006. 8.

[3] 董杏丽,葛耀中,董新洲,等. 行波保护中雷电干扰问题的对策 [J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(9): 74—78.

[4] 李海峰,王钢,赵建仓,等. 输电线路感应雷击暂态特性分析及识别方法 [J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(3):

114—119.

[5] 王钢,李海峰,赵建仓,等. 基于小波多尺度分析的输电线路直击雷暂态识别 [J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(4): 139—144.

[6] 段建东,张保会,等. 超高压线路暂态保护中雷电干扰与短路故障的识别 [J]. 电力系统自动化, 2004, 28(18): 30—35.

[7] 司大军,束洪春,陈学允,等. 输电线路雷击的电磁暂态特性分析及识别方法研究 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(7): 64—67.

[8] 段建东,任晋峰,张保会,等. 超高速保护中雷电干扰识别的暂态法研究 [J]. 中国电机工程学报, 2006, (23): 7—13.

作者简介:

张丽娜 (1984—),女,硕士研究生,研究方向是电力系统继电保护。

(收稿日期: 2008—12—12)

(上接第 4 页)

[14] Denis Lee Hau Aik Goran Andersson. Voltage stability analysis of multi-infeed HVDC system [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1997, 12(3): 1309—1316.

[15] 林良真,叶林. 电磁暂态分析软件包 PSCAD/EMTDC [J]. 电网技术, 2000, 24(1): 65—66.

[16] M. O. Fenuque Yuyan Zhang Venkata Dinavahi. Detailed modeling of CIGRE HVDC benchmark system using PSCAD/EMTDC and PSB/SMULINK [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(1): 378—387.

作者简介:

艾 飞 (1983—),男,硕士研究生,主要研究方向为高压直流输电、电力系统稳定与控制;

李兴源 (1945—),男,教授,博士生导师,中国电机工程学会理事, IEEE 高级会员,从事电力系统稳定与控制、高压直流输电、分布式发电等研究;

王晓丽 (1981—),女,硕士,主要研究方向为电力系统稳定与控制;

任永生 (1982—),男,主要研究方向为电力系统稳定与控制;

韦 立 (1983—),男,主要研究方向为电力系统稳定与控制;

刘 建 (1984—),男,硕士研究生,主要研究方向为高压直流输电、电力系统稳定与控制。

(收稿日期: 2009—02—19)

考虑负荷静特性的基于奇异值 分解法静态电压稳定分析

吴华坚¹, 李兴源¹, 贺 洋¹, 郑景轩², 王 韬³, 弭 磊⁴, 刘仁杰⁴

(1. 四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065; 2. 四川攀枝花供电局, 四川 攀枝花 617000;

3. 浙江省德清供电局, 浙江 德清 313200; 4. 长江电力股份有限公司, 湖北 宜昌 443002)

摘 要:随着电网规模的不断扩大, 电压崩溃事故的频发, 电力系统电压稳定性问题已经受到越来越多的关注, 逐渐成为电力界的一个研究热点。电压稳定又称负荷稳定, 负荷特性是电压稳定研究的关键问题。在总结前人研究成果的基础上, 就奇异值分解法应用于考虑负荷静特性的电力系统进行静态电压稳定分析做了一些探索性工作。首先概述了电压稳定问题研究的历史和现状, 阐述了电压失稳的机理并对各种静态以及动态电压稳定分析方法进行了介绍。接着介绍了奇异值分解法。奇异值分解法的数学理论严谨, 判别指标准确、简洁、实用。在奇异值分解法的基础上, 运用电压稳定指标在 IEEE14 节点和 IEEE39 节点标准系统中进行了仿真验证, 对各个指标进行了物理意义分析, 证实了方法的正确性。对系统采用了不同的负荷模型进行电压稳定分析, 得出了关于考虑了负荷模型的实际系统分析的有用结论。最后, 基于奇异值分解法得出的结论, 提出了预防电压失稳、防止电压崩溃、提高系统电压稳定性的控制措施。

关键词:电力系统; 静态电压稳定; 奇异值分解法; 静态负荷模型

Abstract: As power system becoming larger and larger, the frequency of voltage collapse accidents becomes higher and higher. So voltage stability of power system has been focused on by more and more people and become a hot topic in power industry. Voltage stability is also called load stability, and the research of load characteristics is the key. Based on the former achievements, some work has been done that how singular value decomposition method can be applied to static voltage stability analysis based on static load model. Firstly, it gives an introduction to the history and the current situation of voltage stability problem and the principle of voltage instability, as well as all kinds of voltage stability analysis methods, both static and dynamic. Then the singular value decomposition is introduced. The mathematical theory of singular value decomposition method is very rigorous, and the criteria of voltage stability are precise, concise and practical. The fourth chapter validates SVD method through IEEE 14 buses standard system and IEEE 39 buses standard system, and the physical meanings of all criteria are analyzed, which proves SVD method practical. The standard system based on different load model has been analyzed using SVD method, and some conclusions have been gotten that are useful to practical systems. At last, based on the conclusions, some measures are given to avoid the voltage instability or voltage collapse and to improve the voltage stability of power system.

Key words: power system; static voltage stability; SVD method; static load model

中图分类号: TM732 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)03-0005-04

电力系统是一个十分庞大的复杂的非线性系统。随着电网规模不断扩大, 电力系统的电压稳定问题变得越来越突出。20 世纪 70 年代后世界上许多国家发生了电压失稳事故, 造成了巨大的经济损失和社会影响。这类事故的共同特征是当系统发生扰动时, 系统的频率和角度基本维持不变, 而某些节点的电压持续快速下降, 造成电压崩溃, 最终导致系统瓦解。中国经济正处于飞速发展时期, 电网常处于满负荷运行

状态, 这对电压稳定是十分不利的。因此, 借鉴国内外的研究经验和实际教训, 加快对电压失稳发生的机理和控制措施的研究, 减少和避免电压崩溃事故的发生, 具有十分重要的意义。

但迄今为止, 电压稳定的研究存在许多难题, 如负荷模型的建立, 各种元件的动态过程及其相互影响等。伴随着国内外电网的互联、直流输电以及 FACTS 技术的应用, 电力系统又呈现了一些新的特点, 这些因素很大程度上增加了维持电力系统电压稳定的难度, 容易造成电压不稳定, 因此对其的分析和

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (2004CB217901); 国家科技支撑计划项目 (2008BAA13B01); 国家电网公司项目

控制研究迫在眉睫。

电力系统是一个复杂的非线性动力系统,它的动态行为被归结为一个非线性微分-差分-代数方程组 (DDAE)。可以认为,所有电压稳定问题及相关问题的研究都是围绕电力系统的 DDAE 的基本性质展开的。由于侧重点不同,分析方法也不同,主要分为静态电压稳定分析和动态电压稳定分析。静态电压稳定分析方法主要是通过代数方程来计算分析。其理论上认为电压稳定是一个潮流方程是否存在可行解的问题,因而把临界潮流看作是电压稳定的极限;另一方面,由于静态分析技术比较成熟,易于给出电压稳定裕度指标及对状态量的灵敏度信息。而动态电压稳定分析主要是通过微分-代数方程来计算分析。

这里以电力系统电压稳定分析为研究方向,考虑负荷的静特性对电压稳定的影响,就奇异值分解法在电压稳定分析中的应用作了详细的论述。并通过实际算例分析了不同的负荷模型对电力系统电压稳定的不同影响,得出了一些有用的结论。

1 奇异值分解法

设 $A \in \mathbb{R}^{m \times n}$, A 的奇异值 δ_i 定义为矩阵 $A^T A$ 的特征值 $\lambda_i (\geq 0)$ 的算术平方根,即 $\delta_i = \sqrt{\lambda_i}^{[2]}$ 。 A 的右奇异向量就是 $A^T A$ 的单位正交右特征向量。 A 的左奇异向量就是 AA^T 的单位正交右特征向量。

设 $A \in \mathbb{R}^{m \times n}$, 则存在单位正交矩阵 U 和 V , 使得

$$V^T A U = \begin{bmatrix} \Sigma & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $\Sigma = \text{diag}(\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_r)$, 且 $\delta_{\max} = \delta_1 \geq \delta_2 \geq \dots \geq \delta_r = \delta_{\min} \geq 0$ 。

则 A 的奇异值分解为

$$A = V \Sigma U^T \quad (2)$$

矩阵的奇异性程度可以用条件数来表示,满秩矩阵的条件数为

$$\text{Con}(A) = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\min}} \quad (3)$$

式中: $\sigma_{\max}$ 和 $\sigma_{\min}$ 是矩阵 A 的最大和最小奇异值。如果 A 奇异, 则 $\sigma_{\min} = 0$ 且 $\text{Con}(A)$ 为无穷大。显然, $\text{Con}(A) \geq 1$ 。对于方阵 A 如果 $\text{Con}(A)$ 接近 1, 那么 A 远离奇异; 而如果 $\text{Con}(A)$ 是大的, 那么矩阵 A 接近奇异。如果 $\text{Con}(A) > \text{Con}(B)$, 则认为矩阵 A 比 B 矩

阵更奇异。

根据线性系统理论对于 $AX=b$ $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$, A 是非奇异的, 而 $b \in \mathbb{R}^n$ 。在对矩阵 A 进行奇异值分解之后, 线性系统的解可以写成

$$X = A^{-1} b = (V \Sigma U^T)^{-1} b = \sum_{i=1}^n \frac{u_i v_i^T}{\sigma_i} \quad (4)$$

由式 (4) 可以得知, 如果 σ_i 充分小的话, 则矩阵 A 或向量 b 的微小变化就会引起 X 大的变化。

2 基于奇异值分解的电压稳定性分析

若一个系统除了平衡节点外, 总共有 n 个节点, PV 节点数为 m 。在正常运行条件下, 方程的线性化形式为

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta U \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{P\theta} & J_{PV} \\ J_{Q\theta} & J_{QU} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta U \end{bmatrix} \quad (5)$$

对 J 进行奇异值分解, 可以得到

$$J = V \Sigma U^T = \sum_{i=1}^{2n-m} v_i \delta_i u_i^T \quad (6)$$

如果 J 非奇异, 则有功功率和无功功率注入的微小变化对 $[\Delta \theta \ \Delta U]^T$ 的影响可以写成

$$\begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta U \end{bmatrix} = J^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \Sigma^{-1} u_i v_i^T \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (7)$$

当一个奇异值几乎为零时, 系统接近于电压崩溃点, 系统响应完全由最小奇异值 δ_{2n-m} 和它相应的奇异向量 v_{2n-m} 和 u_{2n-m} 所决定。则

$$\begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta U \end{bmatrix} = \frac{u_{2n-m}}{\delta_{2n-m}} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = v_{2n-m} \quad (8)$$

由式 (8) 可以得出结论, 因为最小奇异值充分小, 所以功率注入的微小变化可以引起电压大的变化。因此, 有关左、右奇异值向量 v_{2n-m} 和 u_{2n-m} 可以说明如下:

1) 在 u_{2n-m} 中最大的表列值 (元素) 指示最灵敏的节点电压 (临界电压)。因此, 弱节点可以通过右奇异向量来识别。

2) 在 v_{2n-m} 中最大的表列值相当于有功和无功功率注入变化最灵敏的方向, 因此, 从左奇异向量可以获得最危险的负荷和发电量的变化模式。

3) 在式 (8) 中, 提供了节点电压处功率注入变化的典型模式。

4) 在式 (9) 中, 提供了节点电压和角度改变的典型模式。

5)左奇异向量还可以提供关于通过不同运行区域的传输功率(界面功率)对电压稳定性的影响。借助左奇异向量分析可以选择出弱传输线。

弱节点的识别和排序是根据与最小奇异值对应的右奇异向量的元素 u_{n-m} 进行的。如前提出的,在 u_{n-m} 中的最大表列值指示最灵敏的节点电压,所以节点强弱程度的指标可以定义为

$$LC_j = U_j / \delta_{n-m} \quad j \in \{1, 2, \dots, n-m\} \quad (9)$$

3 静态负荷模型分析

在以潮流计算为基础的稳态分析中,负荷模型大多采用静态负荷模型,在电力系统动态仿真中,静态负荷模型一般适用于电压扰动不太复杂,且扰动幅度不太大的长过程分析中。

(1)传统指数模型

$$\begin{cases} P = P_0 (\frac{V}{V_0})^a \\ Q = Q_0 (\frac{V}{V_0})^b \end{cases} \quad (10)$$

(2)多项式模型

$$\begin{cases} P = P_0 \left[A_m (\frac{V}{V_0})^m + \dots + A_1 (\frac{V}{V_0}) + A_0 \right] \\ Q = Q_0 \left[B_m (\frac{V}{V_0})^m + \dots + B_1 (\frac{V}{V_0}) + B_0 \right] \end{cases} \quad (11)$$

通常高次项的负荷很少,所以多项式模型又通常写为:

$$\begin{cases} P = P_0 \left[A_2 (\frac{V}{V_0})^2 + \dots + A_1 (\frac{V}{V_0}) + A_0 \right] \\ Q = Q_0 \left[B_2 (\frac{V}{V_0})^2 + \dots + B_1 (\frac{V}{V_0}) + B_0 \right] \end{cases} \quad (12)$$

其中, $A_2 + A_1 + A_0 = 1$, $B_2 + B_1 + B_0 = 1$ 。这个模型又称为 ZIP 模型。

在电压稳定性分析及其他电力系统仿真计算中,最常用的静态负荷模型是 ZIP 模型。由于多项式模型使用较灵活,可以形成不同的组合,所以这里将采用 ZIP 模型。

4 仿真分析

为了检验奇异值分解法的有效性以及分析不同的负荷特性对静态电压稳定的影响,本章将选两个 IEEE 的标准系统,分别为 IEEE 14 节点和 IEEE 39

节点系统进行编程分析。

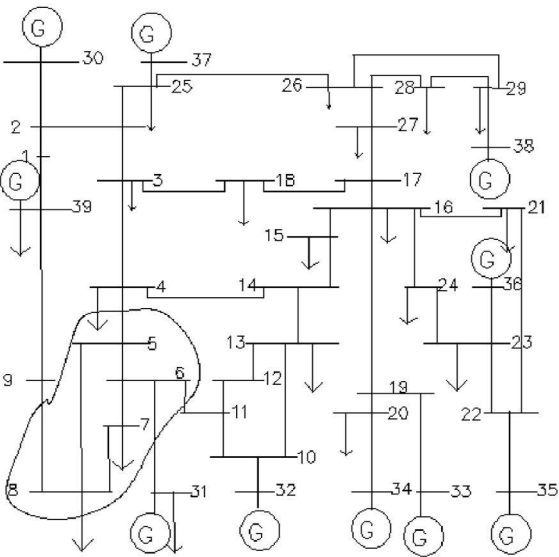


图 1 节点标准系统结构图

表 1 指标比较

节点编号	工况状态	临界状态
1	0.001 26	0.331 98
2	0.001 49	0.804 13
3	0.000 020 2	2.035 7
4	0.004 33	4.908 5
5	0.006 816 6	7.558 1
6	0.006 891	7.760 3
7	0.007 074 1	9.592 1
8	0.006 909 8	8.671 4
9	0.003 096 9	2.768 5
10	0.004 384 5	4.346 4
11	0.005 060 9	5.404 1
12	0.005 235 7	5.157 4
13	0.004 538 4	4.330 9
14	0.003 925 7	4.058 5
15	0.000 694	2.106 8
16	0.000 384	1.284
17	0.000 21	1.383 1
18	0.000 164	1.635 8
19	0.000 36	0.447 44
20	0.000 194	0.256 65
21	0.000 842	0.889 88
22	0.000 677	0.459 63
23	0.000 76	0.478 35
24	0.000 594	1.157 8
25	0.001 793 3	0.594 42
26	0.000 127 3	0.746 32
27	0.000 034 9	1.048 4
28	0.000 336	0.380 82
29	0.000 356	0.259 8

维持发电机和其他节点负荷不变,增加 7 号节点

的负荷水平,负荷增长方式采用恒功率因数的负荷增长方式:

$$P_7^{n+1} = P_7^n + \frac{2.338}{0.8 \times n} \tag{13}$$

$$Q_7^{n+1} = Q_7^n + \frac{0.84}{0.8 \times n} \tag{14}$$

其中, n表示增加的次数。

表 2 弱区域内节点实际电压水平

U ₅	U ₆	U ₇	U ₈
0.732 3	0.729 54	0.662 97	0.689 69

由表 1和图 1可以看出,随着负荷的加重,大多数 PQ节点的 LC指标都增大,其中,由 5、6、7、8号节点所构成的区域内的 LC指标都超过了 7.5,而最弱节点 7号节点的 LC指标甚至超过了 9.5,电压已经很不稳定。从表 2中也可以清楚地看出,弱区域内的实际电压水平已经降了很多。这说明随着负荷的增长,某些薄弱节点会构成一个薄弱区域,整个区域内的电压都会有不同程度的下降,从而对区域的稳定构成威胁。而用最小奇异值和指标可以很好地对薄弱节点和薄弱区域进行识别,从而有利于运行人员根据这些指标做出相应的操作以利于系统稳定运行。

在上面的分析当中,考虑的是恒功率负荷模型下的电压稳定分析。然而在实际的系统中,负荷模型不可能只有恒功率部分,还包括恒阻抗和恒电流部分,而且不同组合的负荷模型对系统的电压稳定的影响肯定是有差别的,在这部分中就将选取三个不同的负荷模型组合,来分析它们对系统电压稳定的影响。采用的负荷增长不变。

下面再比较上面所选的三个不同组合的模型下系统的稳定极限。

系统的负荷模型选用 ZIP模型,通过选取三个不同的二次项、一次项和常数项系数值,确定三个用于仿真的系统,具体参数如表 2所示。

由表 2可以看出,当恒阻抗和恒电流部分所占比重越大的时候,系统的功率极限也就越大,系统就可以抵抗越大的负荷增长,系统也就越稳定。

表 3 系统不同负荷模型极限功率比较

负荷模型	有功极限(标么值)
A ₂ =B ₂ =0.1, A ₁ =B ₁ =0.2, A ₀ =B ₀ =0.7	20.559
A ₂ =B ₂ =0.2, A ₁ =B ₁ =0.3, A ₀ =B ₀ =0.5	25.274
A ₂ =B ₂ =0.3, A ₁ =B ₁ =0.5, A ₀ =B ₀ =0.2	39.849

5 结 论

系统的稳定裕度可以通过最小奇异值 δ_{min}来判断,奇异值越接近于零,说明系统越接近崩溃点,也就越不稳定。随着负荷的增加,最小奇异值 δ_{min}逐步减小,而且减小的速度越来越快。当系统重载的时候,系统的节点电压会下降,随着重载程度的加大,有更多的节点会变成薄弱节点。在某些系统中,一些相邻的若干个薄弱节点会构成几个薄弱区域。在这些区域中,呈现出区域内的节点电压比其他节点的电压水平低很多。当 ZIP模型中三个部分的系数取不同值的时候,对于相同的负荷增长,电压的水平存在差异。从上面的仿真中可以看出,当恒阻抗和恒电流部分所占比重越大的时候,系统的功率极限也就越大,系统就可以抵抗越大的负荷增长,系统也就越稳定。所以在实际系统的电压稳定分析时,应该考虑分析时的实际静态负荷模型,从而更准确地进行电压稳定分析。

参考文献

[1] 王梅义,吴竟昌.大电网系统技术(第二版)[M].北京:中国电力出版社,1995.

[2] 周双喜,朱凌志,郭锡玖,王小海.电力系统电压稳定性及其控制[M].北京:中国电力出版社,2004.

[3] CIGRE Task Force 38.02.10. Modeling of Voltage Collapse Including Dynamic phenomena[J]. Electra, 1993(147): 71—77.

[4] 吴国梁.基于 SVD理论对四川电网电压静稳的实证研究[D].四川大学,2005.5.

[5] 段献忠,何仰赞,陈树德.电压崩溃机理探讨[J].电力系统自动化学报,1991,3(2): 1—7.

[6] 傅旭,王锡凡,杜正春.电力系统电压稳定性研究现状及其展望[J].电力自动化设备,2005,25(2): 1—9.

[7] 潘文霞,陈允平,沈祖诒.电力系统电压稳定性研究综述[J].电网技术,2001,25(9): 51—54.

[8] 陈敏,张步涵,段献忠,胡德封.基于最小奇异值灵敏度的电压稳定薄弱节点研究[J].电网技术,2006,30(24): 36—39.

[9] 李兴源,王秀英.基于静态等值和奇异值分解的快速电压稳定性分析方法[J].中国电机工程学报,2003,23(4): 1—5.

[10] 冯治鸿,刘取,倪以信,黄眉.多机电力系统静态稳定性分析——奇异值分解法[J].中国电机工程学报,1995.

(下转第 13 页)

和适应能力;对中期负荷预测的试验同样证明运用 HHT 的方法比直接预测的效果好,如果进行深入研究,考虑经济、人口、气候和电价等影响因素应该能达到比较高的预测效果。

参考文献

[1] 孙洪波,徐国禹,秦翼鸿.模糊理论在电力系统符合预测中的应用[J].重庆大学学报,1994,17(1):18—22

[2] 陈章潮,顾洁.模糊在上海浦东新区电力负荷预测中的应用[J].系统工程理论与实践,1995(1):63—68.

[3] Kadil MS, El-Debeliky SM, Hasanien NE. Long-term Load Forecasting for Fast Developing Utility Using a Knowledge-based Expert System. IEEE Trans on Power Systems 2002, 17(2): 491—496.

[4] Bhattacharya TK, Basu TK. Medium Range Forecasting of Power System Load Using Modified Kalman Filter and Walsh Transform [J]. International Journal of Electrical Power and Energy System, 1993, 15(2): 257—262.

[5] Sfetsos A. Short-term Load Forecasting with a Hybrid Clustering Algorithm [J]. IEEE Proceedings Communications 2003, 150(3): 257—262.

(上接第 8 页)

12(3): 10—19.

[11] 韩祯祥,曹一家.电力系统的安全性及防治措施[J].电网技术,2004,28(9):1—6.

[12] 鞠平,马大强.电力系统负荷建模[M].北京:水利电力出版社,1995.

[13] 李欣然,贺仁睦,章健,等.负荷特性对电力系统静态电压稳定性的影响和静态电压稳定性广义实用判据[J].中国电机工程学报,1999,19(4):23—30.

[14] 程浩忠.电力系统电压崩溃临界状态的近似算法[J].电力系统自动化,1996,20(5):14—18.

[15] 鞠平.电力系统负荷建模理论与实践[J].电力系统自动化,1999,23(19):1—7.

[16] Sekine Y. and Yokoyama A. A Static Voltage Stability Index Based on Multiple Load Flow Solutions of Bulk Power System Voltage Phenomena[J]. Voltage Stability and Security, 1989, (5): 65—72.

[17] 段献忠.电压稳定问题的机理和建模及实用算法研究

[6] 王东生,曹磊.混沌、分形及其应用[M].中国科学技术出版社,1995.

[7] 吴小明,邱家驹,张国江,等.软计算机方法和数据挖掘在电力系统负荷预测中的应用[J].电力系统及其自动化学报,2003,15(1):1—4.

[8] 徐军华,刘天琪.基于小波分解和人工神经网络的短期负荷预测[J].电网技术,2004,28(8):30—33.

[9] Zhihui ZHU, Yunlian SUN, Huangqiang LI. Hybrid of EMD and SVMs for Short-Term Load Forecasting [J]. IEEE International Conference on Control and Automation 2007, 5: 30—6. 1: 1044—1047.

[10] 李媛媛,牛东晓,乞建勋,刘达.基于因散经验模式分解的电力负荷混合预测方法[J].电网技术,2008,32(8):58—62.

[11] 胡国胜,陈一天.基于 HHT 变换的电机故障信号频率分析[J].电力学报,2005,20(4):327—330.

作者简介:

白玮莉(1986—),女,硕士研究生,研究方向为 HHT 在电力系统中的应用。

(收稿日期:2009—03—24)

[D]. 华中理工大学博士学位论文,1992

[18] IEEE Power System Stability Subcommittee. Special Publication Voltage Stability Assessment Procedures and Guides Final Draft. 1999.

[19] 刘天琪,邱晓燕.电力系统分析[M].北京:科学出版社,2005.

[20] H. D. Chiang and F. F. Wu. Stability of Nonlinear Systems Described by a Second-Order Vector Differential Equation [J]. IEEE Trans on CAS. 1998, 35(6): 703—711.

作者简介:

吴华坚,男,硕士研究生,主要从事电力系统稳定分析和控制及其高压直流输电系统的分析和研究工作;

李兴源,男,教授,博士生导师,主要从事电力系统稳定分析和控制及其高压直流输电研究;

贺洋,男,硕士研究生,主要从事电力系统电压稳定分析及控制。

(收稿日期:2009—03—06)

基于 HHT 的电力系统负荷预测

白玮莉, 刘志刚, 王 奇, 周登登

(西南交通大学电气化自动化研究所, 四川 成都 610031)

摘 要: 针对电力系统负荷序列既具有波动性又具有特殊周期性, 目前常用负荷分析方法多依赖主观经验的问题, 而提出基于 HHT 的电力系统负荷预测方法, 将原本复杂的时间序列分解成具有一定规律和周期性的分量之和, 求其频谱, 对各个分量进行频率特征分析, 分别选用相适应的预测方法, 最后将各个分量预测结果相加得到最终预测值。此方法克服了负荷数据波动性大, 频率复杂难于精确预测的问题。用此种方法对短期和中期负荷数据进行预测分析, 仿真结果表明此方法有较高的精度。

关键词: 负荷预测; HHT; 频谱; 短期和中期

Abstract: The load sequence of power system has both volatility and periodicity, but the common load analysis methods mostly depend on subjective experiences at present. A model based on HHT is proposed. The complex load series can be decomposed to several different series with certain regularity and periodicity. Through calculating the spectrum of decomposed series, the different forecasting methods can be chosen according to the features of decomposed components. The superposition of forecasting results of the components can be obtained as the ultimate forecasting value at last. The problems that the fault of load data has the complex frequency and is difficult to be predicted accurately can be overcome. The short-time and monthly load forecasting results show that the proposed method can improve forecasting accuracy effectively.

Key words: load forecasting; HHT; spectrum; short-time and monthly

中图分类号: TM715 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)03-0009-05

长期以来, 国内外学者对负荷预测的理论和方法做了大量的研究, 提出了各种各样的预测方法, 除传统的时间序列法外, 研究较多的是以人工神经网络法为代表的新型智能方法, 它由于具有并行分布信息、自学习及任意逼近连续函数的能力, 尤其能实现非线性映射, 能捕获电力负荷的各种变化趋势, 受到研究人员的青睐。另外模糊理论^[1,2]、专家系统^[3]、卡尔曼滤波^[4]、聚类分析^[5]、混沌分型理论^[6]、数据挖掘^[7]等方法均有成功应用, 它们共同的特点是考虑天气湿度等外界因素对负荷数据直接进行整体性预测, 分析方法多依赖于主观经验, 对数据序列的内在规律提取不够。电力系统负荷序列既具有波动性又具有特殊的周期性, 可看作多个不同频率分量的叠加。每个分量呈近似周期变化, 具有相似的频率特性和一致的变化规律, 也具有更强的可预测性。因此, 在对负荷进行频域分解的基础上, 根据各频率分量特点进行建模是提高预测精度的有效途径。文献[8]利用小波方法有一定的改进, 但小波的固有缺点是, 小波基的选择对分析结果的影响较大, 对分析过程造成

一定的干扰, 文献[9]对 EMD 分解后的子序列全部利用 SVM 进行预测, 没有考虑每个分量的特点及预测方法的适应性, 具有一定的不合理性。文献[10]将 EMD 分解后的子序列重构成三个分量, 用三种不同的预测方法进行预测, 这与利用 EMD 分解提高预测精度的初衷自相矛盾。这里提出基于 HHT 的电力系统负荷预测法, 通过实际数据检验, 此方法可提高预测精度。

1 HHT 算法简介

HHT(Hilbert-Huang Transform)^[11]是全新的信号处理方法, 它由经验模态分解法 EMD 及 Hilbert 变换两部分组成。EMD 算法的目的是将性能不好的信号分解为一组性能较好的具有瞬时频率的固有模态函数(MF)和具有单调性或一个极值点的余项 R_n 。该方法分解过程基于数据信号局部特征, 不需要预先设定参数, 是自适应的。分解得到的 MF 分量都是平稳的, 包含原始信号的局部特征信息, 尤其适用于非线性和非平稳性数据。通过 Hilbert 变换可以清楚

基金项目: 教育部霍英东青年教师基金资助项目(101060); 四川省杰出青年基金项目(07JQ0075)

地了解各分量的频率特征。近几年 HHT 方法已经被成功应用于地球物理学、生物医学、工学等领域的研究。

2 基于 HHT 模型原理和方法

2.1 预测方法

所提出的预测方法步骤如下。

1) 利用小波对信号进行去噪, 该处理可减少噪声对 EMD 分解的干扰, 从而减小边界效应误差和降低分解层数, 提高 EMD 分解的准确性和时效性。

2) 通过 EMD 对负荷数据进行分解, 得到若干个频率由高到低的 MF 分量和余项。

3) 对各个 MF 分量通过 Hilbert 求频谱, 观察其频谱变化情况, 针对每个不同的 MF 频率特征利用相适应的预测算法进行预测来提高预测精度。

4) 将各个 MF 预测值相加得到最终预测结果。

2.2 HHT 算法的应用

首先对去噪后的负荷数据做 EMD 分解, 得到一组 MF 分量及余项, 对各 MF 求频谱的过程如下。

对每个 MF 分量 $c_i(t)$ 作希尔伯特变换可得数据序列 $\hat{c}_i(t)$

$$\hat{c}_i(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{c_i(\tau)}{t-\tau} d\tau \quad (1)$$

由 $c_i(t)$ 和 $\hat{c}_i(t)$ 可以构成一个复序列 $z_i(t)$

$$z_i(t) = c_i(t) + j \hat{c}_i(t) = a_i(t) e^{j\varphi_i(t)} \quad (2)$$

其中, 幅值函数

$$a_i(t) = \sqrt{c_i^2(t) + \hat{c}_i^2(t)} \quad (3)$$

和相位函数

$$\varphi_i(t) = \arctan \frac{\hat{c}_i(t)}{c_i(t)} \quad (4)$$

从而得到瞬时频率为

$$f_i(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\varphi_i(t)}{dt} = \frac{1}{2\pi} \omega_i(t) \quad (5)$$

由此可看出各负荷分量的频率分布和变化范围, 通过它选取合适的负荷预测模型。另外还可以求出负荷序列的时频谱和边际谱, 它们显示了各种频率成分占总时间和总能量的分布情况, 联合频谱可区分出负荷的周期分量及随机分量:

由上式可知 $c_i(t)$ 可表示为

$$c_i(t) = \operatorname{Re}[a_i(t) \exp(j \int \omega_i(t) dt)] \quad (6)$$

若忽略余项 R_n 原负荷数据 $x(t)$ 可以表示为

$$x(t) = \operatorname{Re}[\sum_{i=1}^n a_i(t) \exp(j \int \omega_i(t) dt)] \quad (7)$$

以时间、瞬时频率为自变量, 幅值在时频平面内以等高线表示, 则可以将三者的关系表示成一个三维图形, 定义为 HHT 谱, 记做 $H(\omega, t)$

$$H(\omega, t) = \operatorname{Re}[\sum_{i=1}^n a_i(t) \exp(j \int \omega_i(t) dt)] \quad (8)$$

由此定义希尔伯特边际谱

$$h(\omega) = \int_0^T H(\omega, t) dt \quad (9)$$

式中, T 为负荷持续时间。

2.3 预测模型

电力负荷可表示为周期分量、随机变化量与趋势分量之和。通过 EMD 的平稳化能力, 能突出原负荷的局部特征, 能更明显地看出原负荷序列的周期项、随机项和趋势项, 外部因素的变化信息即为随机项, 一般包含在高频分量当中, 对高频分量的预测即包含了对外部影响因素的估计。根据 MF 变化特点分别建立不同的预测模型, 可提高预测精度。

由于短期和中期负荷数据都既具有波动性又具有特殊周期性, 可以有效地利用 HHT 方法的优点进行预测。

在负荷预测的研究中, 应用最多的神经网络模型是 BP 神经网络, 它结构简单, 处理问题的能力却很强大。然而, 它有过分强调克服学习错误而泛化性能不强的缺点。这使得它对比较平稳的信号预测效果十分理想, 但对于高频宽频波动性和随机性比较大的信号预测不是十分准确。

支持向量机 SVM 的机器学习算法, 实现了结构风险最小化原理 (SRM), 找到经验风险最小和推广能力最大的平衡点, 对未来样本有较好的泛化性能。SVM 算法的计算结果稳定, 不会陷入局部最优值, 较好地解决了小样本、非线性、高维数和局部极小点等实际问题。用于负荷预测具有一定的优势。

另外 ARMA 模型及线性回归也经常应用到, ARMA 模型是时序方法中最基本的、实际应用最广的模型。它是在线性回归模型的基础上引伸并发展起来的, 采用它可显示动态数据本身的结构与规律, 定量地了解观测数据之间的线性相关性, 预测其未来值, 它对平稳信号有较好的预测精度。

在文中会运用到这四种方法。

3 仿 真

3.1 短期预测

这里选取西南某地区 2005 年变化比较大的 4 月 22 日~5 月 20 日电网负荷数据作为训练和检验样本,如图 1,预测未来一天 24 h 的负荷数据。

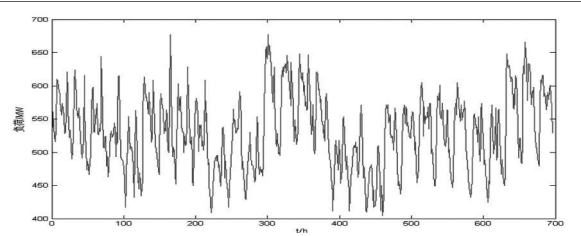


图 1 原始负荷数据

取 4 月 27 日~5 月 11 日的数据,对 5 月 12 日的负荷数据进行预测。经去噪后通过 EMD 分解为 6 个 MF 分量与一个余项 r 如图 2。图 3 为通过 Hilbert 方法求频谱,图 4、图 5 分别为负荷时频谱和边际谱。

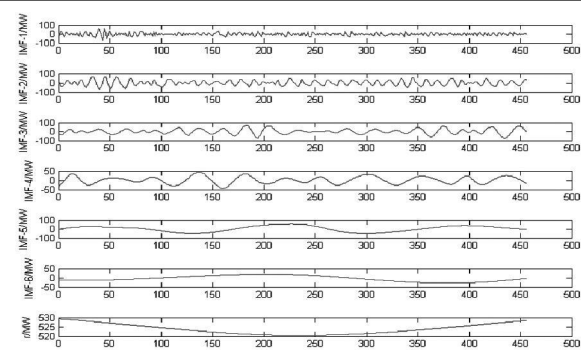


图 2 EMD 分量

设负荷实际值为 $R(i)$, 预测值为 $Y(i)$, 则每点相对预测误差:

$$e_i = [|R(i) - Y(i)| / R(i)] \times 100\% \quad (10)$$

平均误差:

$$ee = \frac{1}{24} \sum_{i=1}^{24} e_i \quad (11)$$

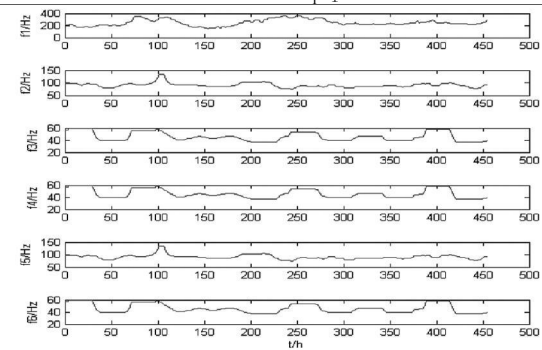


图 3 各 MF 分量频谱

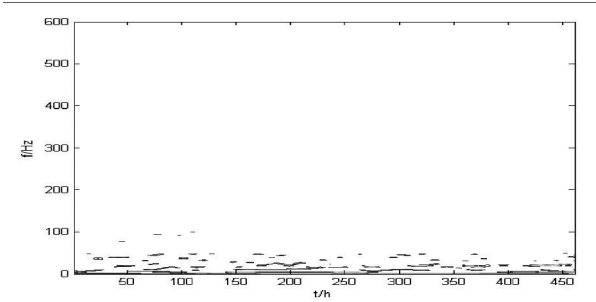


图 4 负荷时频谱

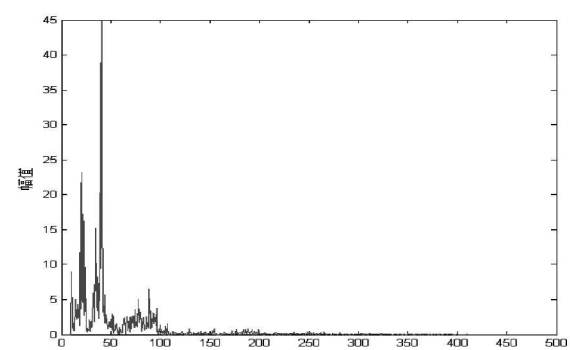


图 5 负荷边际谱

从图 2 和图 3 可清楚地看出各个分量的变化趋势和各自所包含的频率成分,图 4、图 5 说明了负荷的频率能量分布,从图示中可看出数据主要包含的是 100 Hz 以下的成分,这部分主要为负荷的周期成分,如图 2 中的 MF3~6; MF1~2 的频率成分能量较小,主要是负荷的随机变化量,即外界影响因素的随机波动,余项是负荷的基荷变化情况。

基于以上分析,由于 MF1~3 所含频率成分较高,变化波动较明显,对这部分利用 LS-SVM 方法进行预测,选取 RBF 核函数, MF4~6 频率较低,基本平稳,对这部分利用神经网络 BP 方法进行预测,采用 15-25-1 结构。对于余项其变化比较稳定,直接用线性回归模型即可。将此种方法的预测误差与 HHT-SVM (每个分量均用 SVM 预测)、SVM (不进行 EMD 分解直接预测) 进行比较,列表如表 1。

从表 1 可看出本预测方法效果最好,比 HHT-SVM 预测精度高,说明根据各 MF 分量不同的特征选用不同的预测算法比单一使用一种预测方法效果好。

3.2 中期预测

选取某地区 2004 年 1 月~2008 年 5 月的月负荷数据,2004 年 1 月~2007 年 9 月作为训练学习样本,预测 2007 年 10 月~2008 年 2 月的月负荷。图 6 是负荷曲线及经 EMD 分解的各个 MF 分量,同样在分解之前进行去噪处理。

从图 7、图 8 可看到经 EMD 分解后原信号被分解为三个模态, 每个 MF 分量基本上都是平稳窄带信号, 图 9、图 10 说明月负荷数据的频率成分较集中在 0~20 Hz 是负荷的周期成分, 高频成分集中在 MF1 中, 经多次试验结果对比, 采用 BP 对 MF1、ARMA 对 MF2~3 进行预测, 对于余项同样利用线性回归模型。由于本试验中没有考虑经济、人口、气候和电价等影响因素, 所以预测精度不高。预测结果如表 2。

表 1 5 月 12 日 24 时负荷预测误差 % 比较

预测时刻 /h	SVM %	HHT-SVM %	本文方法 %
0:00	4.42	1.44	0.17
1:00	2.16	5.80	3.51
2:00	8.94	1.55	0.20
3:00	8.09	2.52	0.83
4:00	8.03	0.50	1.55
5:00	6.59	0.56	2.41
6:00	0.62	5.24	1.81
7:00	4.15	6.86	3.40
8:00	5.12	5.75	2.45
9:00	5.58	4.46	1.67
10:00	2.01	1.09	3.21
11:00	8.97	3.37	2.70
12:00	9.84	2.45	2.62
13:00	6.60	0.07	0.43
14:00	7.33	2.05	3.10
15:00	4.44	0.56	1.62
16:00	0.47	3.19	0.09
17:00	0.18	4.08	0.12
18:00	0.31	5.28	1.04
19:00	3.55	1.81	2.40
20:00	3.76	1.07	1.90
21:00	3.66	1.18	2.4
22:00	1.67	3.48	1.39
23:00	0.24	5.26	0.83
最大误差	9.84	6.86	4.51
平均误差	4.45	2.90	1.79

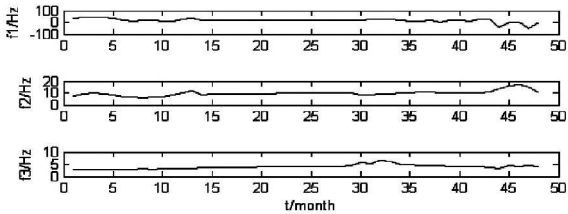


图 7 各 MF 频谱

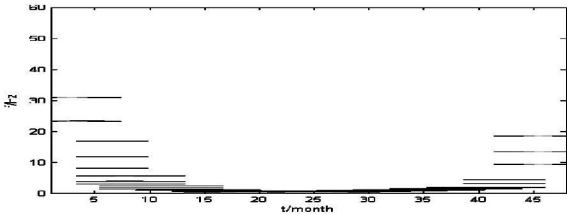


图 8 月负荷时频谱

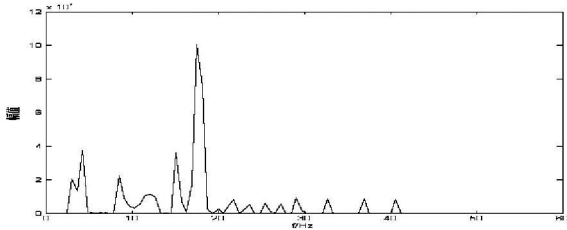


图 9 月负荷边际谱

表 2 中期预测结果

月份	负荷 (MW)	预测值 (MW)	误差 (%)
2007. 10	208 760	211 570	1.35
2007. 11	200 100	198 980	0.56
2007. 12	215 910	210 030	2.65
2008. 01	245 670	238 890	2.76
2008. 02	266 160	258 300	2.95
最大误差			2.95
平均误差			2.05

3.3 长期预测

长期负荷数据一般为年度统计数据, 基本上呈单调递增变化, 无周期性。同时由于数据太短, 用 EMD 方法往往会引起较严重的端点效应, 严重影响预测效果, 对于长期负荷预测往往采用灰色预测模型或各种数学曲线的回归分析模型即可。

4 结 论

提出了基于 HHT 的电力系统负荷预测模型, 首先经过 EMD 将负荷数据分解成一系列频率相对独立的 MF 分量和余项, 再用 Hilbert 对每个 MF 求频谱, 选取适当的预测方法对 MF 进行预测。在短期负荷预测中无须考虑复杂的数学模型和外部天气等随机因素, 经过仿真结果证明该方法具有较高的预测精度

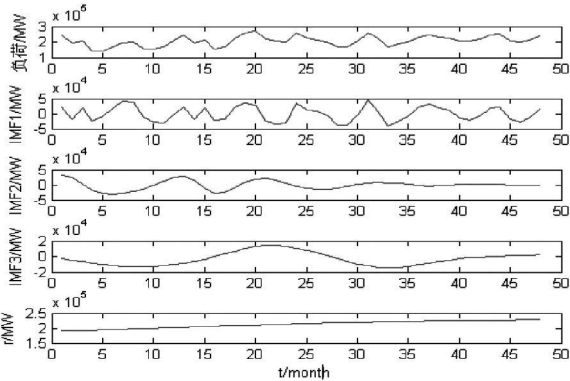


图 6 EMD 分量

和适应能力;对中期负荷预测的试验同样证明运用 HHT 的方法比直接预测的效果好,如果进行深入研究,考虑经济、人口、气候和电价等影响因素应该能达到比较高的预测效果。

参考文献

[1] 孙洪波,徐国禹,秦翼鸿.模糊理论在电力系统符合预测中的应用[J].重庆大学学报,1994,17(1):18—22

[2] 陈章潮,顾洁.模糊在上海浦东新区电力负荷预测中的应用[J].系统工程理论与实践,1995(1):63—68.

[3] Kadil MS, El-Debeliky SM, Hasanien NE. Long-term Load Forecasting for Fast Developing Utility Using a Knowledge-based Expert System. IEEE Trans on Power Systems 2002, 17(2): 491—496.

[4] Bhattacharya TK, Basu TK. Medium Range Forecasting of Power System Load Using Modified Kalman Filter and Walsh Transform [J]. International Journal of Electrical Power and Energy System, 1993, 15(2): 257—262.

[5] Sfetsos A. Short-term Load Forecasting with a Hybrid Clustering Algorithm [J]. IEEE Proceedings Communications 2003, 150(3): 257—262.

(上接第 8 页)

12(3): 10—19.

[11] 韩祯祥,曹一家.电力系统的安全性及防治措施[J].电网技术,2004,28(9):1—6.

[12] 鞠平,马大强.电力系统负荷建模[M].北京:水利电力出版社,1995.

[13] 李欣然,贺仁睦,章健,等.负荷特性对电力系统静态电压稳定性的影响和静态电压稳定性广义实用判据[J].中国电机工程学报,1999,19(4):23—30.

[14] 程浩忠.电力系统电压崩溃临界状态的近似算法[J].电力系统自动化,1996,20(5):14—18.

[15] 鞠平.电力系统负荷建模理论与实践[J].电力系统自动化,1999,23(19):1—7.

[16] Sekine Y. and Yokoyama A. A Static Voltage Stability Index Based on Multiple Load Flow Solutions of Bulk Power System Voltage Phenomena[J]. Voltage Stability and Security, 1989, (5): 65—72.

[17] 段献忠.电压稳定问题的机理和建模及实用算法研究

[6] 王东生,曹磊.混沌、分形及其应用[M].中国科学技术出版社,1995.

[7] 吴小明,邱家驹,张国江,等.软计算机方法和数据挖掘在电力系统负荷预测中的应用[J].电力系统及其自动化学报,2003,15(1):1—4.

[8] 徐军华,刘天琪.基于小波分解和人工神经网络的短期负荷预测[J].电网技术,2004,28(8):30—33.

[9] Zhihui ZHU, Yunlian SUN, Huangqiang LI. Hybrid of EMD and SVMs for Short-Term Load Forecasting [J]. IEEE International Conference on Control and Automation 2007, 5: 30—6. 1: 1044—1047.

[10] 李媛媛,牛东晓,乞建勋,刘达.基于因散经验模式分解的电力负荷混合预测方法[J].电网技术,2008,32(8):58—62.

[11] 胡国胜,陈一天.基于 HHT 变换的电机故障信号频率分析[J].电力学报,2005,20(4):327—330.

作者简介:

白玮莉(1986—),女,硕士研究生,研究方向为 HHT 在电力系统中的应用。

(收稿日期:2009—03—24)

[D]. 华中理工大学博士学位论文,1992

[18] IEEE Power System Stability Subcommittee. Special Publication Voltage Stability Assessment Procedures and Guides Final Draft. 1999.

[19] 刘天琪,邱晓燕.电力系统分析[M].北京:科学出版社,2005.

[20] H. D. Chiang and F. F. Wu. Stability of Nonlinear Systems Described by a Second-Order Vector Differential Equation [J]. IEEE Trans on CAS. 1998, 35(6): 703—711.

作者简介:

吴华坚,男,硕士研究生,主要从事电力系统稳定分析和控制及其高压直流输电系统的分析和研究工作;

李兴源,男,教授,博士生导师,主要从事电力系统稳定分析和控制及其高压直流输电研究;

贺洋,男,硕士研究生,主要从事电力系统电压稳定分析及控制。

(收稿日期:2009—03—06)

新息图法电力系统不良数据检测与辨识

张永超, 黄彦全, 宋廷珍, 穆亚东

(西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031)

摘 要:不良数据检测和辨识是电力系统状态估计的重要组成部分;所采用的新息图方法,结合动态和静态两方面理论,将具有具体物理意义的数据(新息向量),转化为虚拟假设条件下的等价表示,并利用基本的电路理论,达到检测和辨识坏数据以及拓扑错误的目的。该方法具有模型简单、快速准确等优点。以 IEEE-14 节点系统算例,初步验证了所提方法的有效性。

关键词:不良数据检测与辨识;新息图;拓扑错误

Abstract: Detection and identification of bad data is one of the most important parts of power system state estimation. The innovation graph technique based on dynamic and static theory is presented, which translates the material data (innovation vector) into an equivalent variable of another abstract domain for detecting and identifying topology error and bad data using the basic theory of circuit. This method is of simple model, speediness and nicety, whose efficiency is verified by the example of IEEE 14.

Key words: bad data detection and identification; innovation graph; topology error

中图分类号: TM744 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)03-0014-02

在电力系统状态估计过程中,检测和辨识出不良数据,并消除其影响,从而为实时电力系统提供一个可靠的数据库,是状态估计器的一项重要任务。

残差搜索辨识法、非二次准则法、估计辨识法等,主要是将加权残差 $\tilde{v}_k$ 或标准残差 $\tilde{r}_k$ 作为特征值,根据一定的置信度水平确定一个门槛值,进行假设检验。找到可疑量测数据后,将其在量测数据中降低权值或者直接剔除,重新进行状态估计计算。缺点是容易出现残差污染和残差淹没,造成漏检或误检。

文献 [2] 利用量测配置、网络结构和参数的残差灵敏度矩阵与不良数据的大小之间的定量关系,进行假设检验。张伯明教授等提出的递归量测误差估计辨识方法,用线性递归方式计算量测误差的估计值,不需重新计算残差灵敏度矩阵 [3]。文献 [4] 构造了一个神经网络,用正则新息作为输入变量检测与辨识不良数据;文献 [5] 用反向传播神经网络进行估计前滤波,以典型工况的正确量测为训练样本,以便实时辨识不良数据;但是神经网络的辨识效果直接受到训练样本代表性的影响,较难达到预期目标。

所用新息图法 [6] 是由周苏荃教授提出的,借用动态状态估计理论中的新息向量概念,结合网络图

论,建立新息向量元素在空间上的等量关系;集成了静态和动态两方面的约束,能够快速实时地完成不良数据检测和辨识任务。比之传统方法,具有建模简单、运算量小、计算周期短等优点。

1 新息向量及新息图法原理

1.1 新息向量为测量值与预报值之差

$$v_{k+1} = z_{k+1} - h(\tilde{x}_{k+1}) \quad (1)$$

式中, v_{k+1} 为新息向量; z_{k+1} 为 $k+1$ 时刻实际的测量向量; $\tilde{x}_{k+1}$ 是在 k 时刻做出的对 $k+1$ 时刻状态向量的预报值; $h(\tilde{x}_{k+1})$ 是对应 $k+1$ 时刻测量的预报向量。

1.2 新息图 [6]

支路突然断开时,发电机节点注入功率、负荷功率没有发生变化,仅支路潮流发生改变。可以这样理解:支路断开动作,使得各支路潮流在原有值基础上叠加了一个改变量。当仅以这些改变量为研究对象时,它们依照支路拓扑结构,遵循电路基本定律。当已知其中的一部分时,可以求得另外一部分的理论值。

以图 1 所示节点系统为例:各支路均闭合时,其有功潮流大小和方向如图中标示。当支路 6-1 突然断开时,各支路有功潮流改变,其变化量,取决于拓扑

图中的约束,满足基本电路定律 (KVL、KCL)。如图 2 所示。

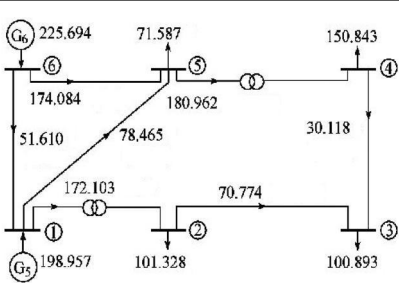


图 1 6 节点系统有功潮流图 (单位: MW)

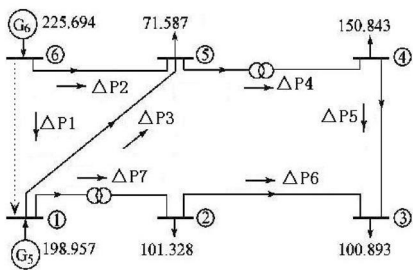


图 2 支路 1—6 突然断开时各支路 ΔP

需要说明的是,对于断开的支路 6—1,相当于在原闭合支路上运用叠加原理,施加了一个与原支路有功等大反向的 ΔP_1 ;并且,各节点注入和负荷功率不变,将有功 P 等同于电流 I 则所有支路 ΔP 满足节点电流定律,以及回路电流法。 ΔP 可以求得:实际测量值(支路断开后)与预报值(假设支路闭合)之差,因而所有 ΔP 值构成新息向量;图 2 即为新息图。

此时,引入图论相关理论,选定树,依据树支和连支新息等量约束关系,可由测得的连支上 ΔP 值(新息值),推算出所有支路(包括树支)上的 ΔP 值(新息)。

2 检测和辨识原理

2.1 拓扑错误

对于断开支路,其新息值(ΔP)较大,因为从能量角度来看,该支路提供了使得系统中所有相关支路潮流发生改变所需的能量。因而,从新息值的大小可以初步判断为断开支路。

2.2 不良数据

选定树支和连支后,利用二者关联矩阵,根据连支新息值,可求得系统所有支路的新息值。该结果为基于连支新息的理论值(ΔP_{li})。定义差别向量^[6] Δv 为真实新息向量与理论新息向量之差。即,

$$\Delta v = v_{k+1} - v_{li} \tag{1}$$

在一个回路中,若仅有一条树支上出现较大差别向量元素,则该支路上的遥测数据为不良数据。当回路中除连支外,所有树支上均出现较大差别向量元素,则该连支遥测数据为不良数据。

如果检测出连支遥测为坏数据,可以改变树的结构,把连支变换为树支,以消除其对于识别拓扑错误的干扰。

3 算例分析

按照上述模型和算法原理,以 IEEE—14 节点系统为例,验证检测和辨识过程。所进行计算系统概况:节点 14 个,其中含发电机节点 5 个;变压器支路 3 条。支路数 20,选择支路 1—2、2—3、2—4、5—6、4—7、6—12、9—14 作为连支,确定树的结构。

仿真条件:正常运行状态下,支路 2—4 突然断开,同时,在支路 2—5 有功量测数据加入 10 倍标准差的增量。量测向量来自支路 2—4 断开的潮流计算值,预报向量为正常运行条件下的有功潮流值。

表 1 IEEE—14 节点系统仿真计算结果

支路号	始点	终点	测量值	预报值	新息值	连支推得新息	差别向量
1	1	2	142.42	147.84	-5.42	-5.42	0
2	1	5	92.03	71.16	20.87	5.42	15.45
3	2	3	90.25	70.01	20.24	20.24	0
4	2	4	0	55.15	-55.15	-55.15	0
5	2	5	66.94	40.97	25.97	29.49	-3.52
6	3	4	-7.47	-24.19	16.72	20.24	-3.52
7	4	5	-96.84	-61.75	-35.09	-30.92	-4.17
8	4	7	26.42	28.36	-1.94	-1.94	0
9	4	9	15.10	16.55	-1.45	-2.05	0.60
10	5	6	46.78	42.79	3.99	3.99	0
11	6	11	8.97	6.73	2.24	2.73	-0.49
12	6	12	8.01	7.61	0.40	0.4	0
13	6	13	18.60	17.25	1.35	0.86	0.49
14	7	8	0	0	0	0	0
15	7	9	26.42	28.36	-1.94	-1.94	0
16	9	10	3.65	5.77	-2.12	-2.73	0.61
17	9	14	8.38	9.64	-1.26	-1.26	0
18	10	11	-5.36	-3.23	-2.13	-2.73	0.60
19	12	13	1.84	1.51	0.33	0.40	-0.07
20	13	14	6.69	5.26	1.43	1.26	0.17

注:表中量测量的量测值和预报值均为相应支路有功潮流值,单位为 MW。

(下转第 47 页)

避雷器损坏造成的变压器出口短路。

(8)加强变电设备的运行管理,及时发现设备缺陷,保证变压器的正常运行。

(9)加强技术监督工作,严禁设备超周期运行,对室内母线及瓷瓶定期清扫,及时进行耐压试验,确保设备绝缘良好。

(10)每年安排 2 次以上的设备红外线普测,积极开展避雷器在线监测、绝缘在线监测、高压开关 SF₆ 气体在线监测等项目,及时掌握设备运行状况。

(11)对新投运的变压器和未作过变形测试的变

压器全部做一次变形测试,保留测试数据,这样,在变压器遭受出口短路冲击后,可以此作为基础数据判断变压器变形程度,认定变压器能否继续运行。对未发生明显绕组变形的变压器,及时投入运行,不仅节省了大量的人力、物力和财力,还大大缩短了检修周期。

(12)加强电网规划、建设的科学管理,合理安排运行方式,限制短路电流,减小出口短路对变压器造成的损害。

(收稿日期: 2009—02—13)

(上接第 15 页)

由表 1 可得,支路 4 突然断开时,实际测量值为零,结果,依据式 (1),产生了较大的新息值,但不能由此断定支路 4 发生了拓扑错误。应根据差别向量判断是否存在坏数据,并判定其位置。差别向量一系列数据表明,不存在不良回路,因而,连支上的新息值是准确的;支路 2 对应所选树的树支,鉴于较大的差别向量值,判定其上有功量测为坏数据;完全符合仿真条件,且整个判定过程只需要输入量测数据,便可由所编制的程序快速自动完成计算;计算过程不涉及迭代,所以没有收敛问题,以及重新计算的时间问题。

4 结束语

所采用的新息图法^[6]是一种状态估计前的不良数据检测和辨识新方法,能有效的避免残差污染和淹没,同时不用进行重复繁琐迭代计算过程,节省时间。通过基于 IEEE—14 节点系统的仿真实验,充分验证了所用方法的实用性、高效性,以及对估计前检测和辨识方法的贡献。

文中具体的算法及程序在实现过程中,采用了手动(如输入量测数据等步骤)与电脑自动完成相结合的方式;当实际工程应用中,其完全可以通过相应的数据采集、输入输出接口程序的整合,会同核心的 Matlab 程序,得以实现。如何快速变换树的结构,以及快速表述出连支与整个拓扑系统的关联关系,是一个值得进行系统和完善的研究课题。

参考文献

- [1] 于尔铿. 电力系统状态估计 [M]. 北京: 水利电力出版社, 1985.
- [2] 刘广一, 于尔铿, 夏祖治. 状态估计中不良数据可检测及可辨识性的定量分析理论 [J]. 电力系统自动化, 1991, 15(1): 22—26.
- [3] 刘广一, 于尔铿, 夏祖治. 量测系统误差方估计与修正 [J]. 中国电机工程学报, 1990, 10(6): 31—38.
- [4] Souza J C S, Leite da Silva A M, Alves da Silva A P. information debugging in forecasting—Aided state estimation using a pattern analysis approach [J]. In: 12th PSCC, Dresden, 1996. 8.
- [5] Salehfar H, Zhao R. A neural network pre—estimation filter for bad data detection and identification in power system state estimation [J]. Electric power system research, 1995, 34: 127—134.
- [6] 周苏荃, 柳焯. 新息图法拓扑错误辨识 [J]. 电力系统自动化, 2000, 24(4): 23—27.

作者简介:

张永超 (1979—), 男, 硕士研究生, 从事电力系统状态估计方面的研究工作。

黄彦全 (1961—), 男, 博士, 教授, 从事电力系统状态估计、微机保护和变电站综合自动化方面的研究和教学工作。

宋廷珍 (1980—), 男, 硕士研究生, 从事电力系统继电保护方面的研究工作。

穆亚东 (1980—), 男, 硕士研究生, 从事电力系统自动化检测方面的研究工作。

(收稿日期: 2009—04—08)

风电场短期风速的改进 Volterra 自适应预测法

罗海洋, 刘天琪, 李兴源

(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘要:欲提高含大量风电机组电网的安全稳定性及降低其运行成本, 高精度的短期风速预测是一种有效的手段。首先在对具有混沌属性的风速时间序列进行相空间重构的基础之上, 使用一种混沌时间序列的 Volterra 自适应滤波预测法对风速进行了预测; 然后针对该方法滤波系数不易收敛及预测结果存在时延的缺点, 改进了自适应算法的系数更新方法, 从而加快了收敛并提高了预测精度。算例分析结果验证了该方法的可行性和有效性。

关键词:风力发电; 风速预测; Volterra 级数; 自适应预测

Abstract: To ensure the security and stability and also to reduce the operation cost of a power grid which has a great portion of wind power, a precise forecasting of the short-term wind speed would be an effective method. Firstly, the phase space reconstruction is carried out for the wind speed time series and then a Volterra adaptive forecasting method is used to forecast the short-term wind speed. Aiming at the shortages of this method that it is not easy to converge and there exists delay in the forecasting result, a modification in the updating method of the filtering coefficients is proposed, by which the convergence speed of the training progress of the filtering coefficients is accelerated and the precision of the forecasting result is improved. Finally, the forecasting result of an example case shows the feasibility and validity of the proposed forecasting method.

Key words: wind power generation; wind speed forecasting; Volterra series; adaptive forecasting

中图分类号: TM762 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)03-0019-04

随着传统化石燃料的日渐枯竭, 世界各国纷纷采取措施调整本国能源结构, 以风电为代表的可再生清洁能源得到越来越多的重视和发展, 近年以来中国的风电装机容量快速增加^[1~3]。

为平抑含大量风电的电网中风电出力的波动给电网带来的冲击, 需相应地增加常规机组的旋转备用容量, 这样会增加系统的运行费用及煤耗量^[4]。若能对短期风速进行比较准确的预测, 进而根据风机的功率特性曲线预测其功率出力, 则调度部门可根据风电出力预测对调度计划进行实时调整, 从而在保持较少旋转备用容量下既可以有效地减轻风电对电网安全稳定带来的影响, 又可以降低系统运行成本^[1, 3, 5]。

目前国内外风速预测研究主要使用物理预测模型和时间序列预测模型。前者需要使用包括风速、风向、气温、气压等数值天气预报数据, 同时考虑地形及地表粗糙度等情况的影响, 其预测精度较高, 但使用的数据多, 且依赖于准确完善的天气预报服务, 预测成本较高。而时间序列模型仅使用历史风速数据即可进行建模预测, 实现简便。常用时序预测法有卡尔

曼滤波法、时间序列法、人工神经网络法、混沌时间序列法等^[1, 2, 5, 6, 9]。其中, 卡尔曼滤波法的状态和测量方程推导较困难; 时间序列法如采用低阶模型则预测精度低而高阶模型参数估计又较困难; 人工神经网络法存在输入数据的选取及网络结构不易确定等问题。现有风电场风速预测方法的误差在 25% ~ 40%^[1, 3], 精度有待进一步提高。

文献[10]验证了风电出力时间序列具有混沌属性。根据非线性动力学中的相关理论, 混沌时间序列在短期内是可以预测的^[11], 而目前尚未见使用混沌预测方法进行风速预测的报道, 因此, 尝试将混沌方法引入风速预测研究中来, 以期提高风速预测的精度。基于混沌时间序列相空间重构的基本思想和非线性系统的 Volterra 级数展开式, 使用时间正交 (time domain orthogonality, TDO) 自适应算法对风速时间序列进行了预测; 并改进了 Volterra 自适应滤波器系数的更新算法, 加快了训练过程的收敛, 提高了预测精度。

1 风速时间序列的相空间重构

混沌时间序列的判定与预测都是以相空间重构

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50577044); 教育部博士点基金项目 (20070610109)

为基础的。根据 Takens 的嵌入定理, 对于一个时间序列, 只要 $m \geq 2d+1$ (m 是嵌入维数, d 是动力系统的关联维数), 在该 m 维重构空间里即可把吸引子恢复出来, 重构空间中的相轨迹与原动力系统的微分同胚, 重构空间与原动力系统拓扑等价^[11]。对于风速时间序列, 若嵌入维数为 m , 时间延迟为 τ 则重构相空间为

$$Y(i) = \{x(i), x(i+\tau), x(i+2\tau), \dots, x(i+(m-1)\tau)\}, \\ (i = 1, 2, \dots, N; N = n - (m-1)\tau) \quad (1)$$

因此, 风速混沌时间序列相空间重构的关键是嵌入维数 m 及时间延迟 τ 的选取。

1.1 求时间延迟

求时间延迟的常用方法有自相关法及互信息法。自相关法主要是提取时间序列的线性相关性, 而互信息法是两个随机变量间一般性随机关联的度量, 包括线性和非线性, 在延迟时间的选取上要优于自相关法^[11]。下面介绍互信息法原理。

令 $\{x(i), i = 1, 2, \dots, K\}$ 表示一组信号, 设点 $x(i)$ 的概率密度为 $P_x[x(i)]$; 令 $\{y(j), j = 1, 2, \dots, K\}$ 表示另一组信号, 在点 $y(j)$ 处的概率密度为 $P_y[y(j)]$; 两组信号的联合概率, 即同时测得 $x(i)$ 、 $y(j)$ 的概率为 $P_{xy}[x(i), y(j)]$ 。对两组信号 $\{x(i), y(j)\}$, 给定 $x(i)$ 的一个测量值, 预测 $y(j)$ 的平均信息量为互信息函数

$$I(x, y) = H(x) + H(y) - H(x, y) \\ H(x) = -\sum_i P_x[x(i)] \ln\{P_x[x(i)]\} \quad (2) \\ H(x, y) = -\sum_{i,j} P_{xy}[x(i), y(j)] \ln\{P_{xy}[x(i), y(j)]\}$$

式中: $H(x)$ 是信号 $\{x(i)\}$ 的熵, 表示对指定系统的 K 个 $x(i)$ 测量得到的平均信息量; $H(y)$ 定义与 $H(x)$ 类似; $H(x, y)$ 是联合熵。

在风速时间序列相空间重构中关心的是 $x(t+\tau)$ 值对 $x(t)$ 值的依赖性。因此可以求 $\{x(t)\}$ 和 $\{x(t+\tau)\}$ 两个序列的互信息。为得到互信息 I 与时间延迟 τ 的函数关系, 将 τ 取值从 1 逐渐增加, 分别求得每个 τ 对应的 I 值。这样互信息函数 I 取第一个极小值时对应的 τ 为最佳延迟时间。

1.2 嵌入维数的确定

使用 G-P 算法计算重构相空间嵌入维数。定义 m 维重构相空间中两相点间的关联积分为

$$C_m(r) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i \neq j}^N \theta(r - |Y(i) - Y(j)|) \quad (3)$$

式中: $|Y(i) - Y(j)|$ 为两相点间的距离; r 代表某一距离阈值; N 为相点数; $\theta(x)$ 是 Heaviside 函数

$$\theta(x) = \begin{cases} 1 & x \geq 0 \\ 0 & x < 0 \end{cases}$$

$C_m(r)$ 为相空间中吸引子上两点之间的距离小于 r 的概率。对于 r 的适当范围, 吸引子关联维数 d_m 与 $C_m(r)$ 满足以下对数线性关系

$$d_m = \ln C_m(r) / \ln r \quad (4)$$

对某个时间延迟 τ 先选择一个较小的 m 值, 重构相空间。然后对不同的邻域半径 r 分别根据式 (3) 计算相应的 $C_m(r)$, 将这些不同的 r 和 $C_m(r)$ 值代入式 (4) 可拟合出 d_m 。增加 m 的值, 重复以上步骤, 求出一系列的 d_m 值。

若风速观测序列的原动力学系统中存在奇异吸引子, 那么随着嵌入维数 m 的增加, d_m 会逐渐增加并收敛到一个定值 d 为分数。这样可选嵌入维数值为 m , 使 $m \geq 2d+1$ 。分数维的关联维数也是系统具有混沌属性的一个标志^[11]。

2 短期风速的 Volterra 自适应预测法

2.1 基本原理

设非线性离散系统的输入为 $Y(n) = \{x(n), x(n-1), \dots, x(n-N+1)\}$, 输出 $y(n) = \hat{x}(n+1)$, 则该非线性系统函数的 Volterra 级数展开式为

$$\hat{x}(n+1) = F(Y(n)) \\ = h_0 + \sum_{m=0}^{+\infty} h_1(m) x(n-m) \\ + \sum_{m_1=0}^{+\infty} \sum_{m_2=0}^{+\infty} h_2(m_1, m_2) x(n-m_1) x(n-m_2) \\ + \sum_{m_1=0}^{+\infty} \sum_{m_2=0}^{+\infty} \dots \sum_{m_p=0}^{+\infty} h_p(m_1, m_2, \dots, m_p) \\ \cdot x(n-m_1) x(n-m_2) \dots x(n-m_p) + \dots \quad (5)$$

其中 $Fy(n)$ 为系统演化模型, $h_p(m_1, m_2, \dots, m_p)$ 为 p 阶 Volterra 核。这种无穷级数展开式在实际应用中难以实现, 为便于应用, 必须采用有限截断有限次求和的形式, 最常用的是式 (6) 所示的二阶截断求和的形式, 其能满足一般工程应用的要求^[12~14]。

$$\hat{x}(n+1) = h_0 + \sum_{m=0}^{N_1-1} h_1(m) x(n-m) \\ + \sum_{m_1=0}^{N_2-1} \sum_{m_2=0}^{N_2-1} h_2(m_1, m_2) x(n-m_1) x(n-m_2) \quad (6)$$

式 (6) 中滤波器的长度 N_1 、 N_2 必须合理确定。对于混沌时间序列, 由 Takens 定理可知, 为了能全面描述其动力学特征, 须满足 $m \geq 2d+1$ (m 是嵌入维数, d 是动力系统的关联维数)。因此, 取 $N_1=N_2=m^{[15]}$, 于是用于风速混沌时间序列预测的 Volterra 滤波器为

$$\hat{x}(n+1) = h_0 + \sum_{i=0}^{m-1} h(i)x(n-i) + \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{m-1} h_2(i,j)x(n-i)x(n-j) \quad (7)$$

其状态扩展后的滤波系数为 h_0 、 $h(i)$ ($i=0, 1, \dots, m-1$)、 $h_2(i,j)$ ($i,j=0, 1, \dots, m-1$), 总共有 $M=1+m+m(m+1)/2$ 个。

令 Volterra 自适应滤波器的输入矢量 $U(n)$ 为 $U(n) = [1, x(n), x(n-1), \dots, x(n-m+1), x^2(n), x(n)x(n-1), \dots, x(n)x(n-m+1), \dots, x^{m-1}(n-m+1)]^T$, 系数矢量为 $H(n) = [h_0, h(0), h(1), \dots, h(m-1), h_2(0,0), h_2(0,1), \dots, h_2(0,m-1), h_2(1,1), \dots, h_2(m-1,m-1)]^T$, 这样式 (7) 可表示为

$$\hat{x}(n+1) = H^T(n)U(n) \quad (8)$$

式 (7) 所示的 Volterra 自适应滤波器的系数可直接利用线性 FIR 滤波器的自适应算法来确定, 对于这种二阶 Volterra 自适应滤波器, 可以采用时间正交 (TDO) 自适应算法^[12, 16]。对于输入矢量和系数矢量分别为 $U(n)$ 和 $H(n)$, TDO 算法可描述如下:

$$\hat{x}(n) = H^T(n-1) \cdot U(n-1)$$

$$H(n) = H(n-1) + \frac{c \cdot e(n)}{U^T(n) \cdot U(n)} U(n-1) \quad (9)$$

$$e(n) = x(n) - \hat{x}(n)$$

其中, $x(n)$ 为测量值, $\hat{x}(n)$ 为预测值, c 是控制收敛性能的参数, 在低阶时常取为 1^[16]。

这样, 取风速时间序列重构相空间中的一个相点 $Y(t)$ 作为输入, 其对应的下一个时刻风速值作为输出, 并使用一定数量的已知数据对 Volterra 滤波器进行训练后, 就可以进行风速预测。

2.2 算法改进

使用前述方法进行风速预测时, 在实验中发现训练过程中滤波系数的收敛较慢甚至不收敛, 且预测结果与实际值的变化之间存在一定的延迟。通过分析发现在 TDO 算法中对 $H(n)$ 进行更新时使用的是前一时刻的误差值 $e(n-1)$, 可能是这一步引入了延

迟。于是将算法调整为使用当前时刻的误差 $e(n)$ 来更新 $H(n)$, 改进后的算法描述如下:

$$\hat{x}(n) = H^T(n-1) \cdot U(n-1)$$

$$H(n) = H(n-1) + \frac{c \cdot e(n)}{U^T(n) \cdot U(n)} U(n-1) \quad (10)$$

$$e(n) = x(n) - \hat{x}(n)$$

通过算例分析验证了改进后的算法能一定程度上加快训练过程的收敛, 且减小了预测输出与实际值之间的延迟, 从而提高了预测精度。

Volterra 自适应预测的具体算法为:

- 1) 用第 1 节中的方法计算风速时间序列的嵌入维数 m 及时间延迟 τ 重构相空间;
- 2) 依次使用重构相空间中各已知相点及对应相点的下一个时刻的已知风速值, 对 Volterra 自适应滤波器系数进行训练;
- 3) 使用训练好的系数 $H(n)$, 以及包含当前风速值的输入矢量 $U(n)$, 根据式 (8), 得到需要的下一时刻的风速预测值 $\hat{x}(n+1)$ 。

3 算例分析

中国某风电场一个月的风速测量数据如图 1 所示, 该序列每小时采样一点。用前 29 天的数据进行建模后对第 30 天的风速进行预测研究。

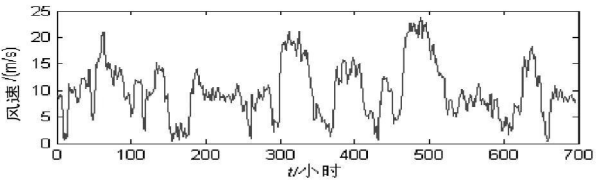


图 1 风电场风速时间序列

对该序列由 1.1 节中的方法依次取 τ 值为 1 至 50, 计算得到 $I-\tau$ 关系如图 2 所示。选互信息函数第一次达到极小值时的时间延迟 6 为 τ 的最佳值。

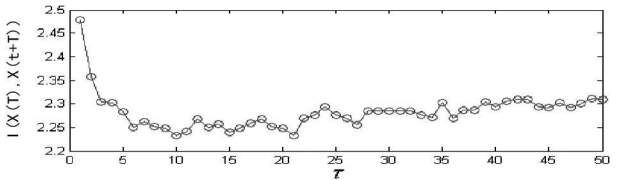


图 2 互信息函数值与时间延迟关系

取 $\tau=6$, m 值依次取 1 至 30, 进行关联维数分析, 得到图 3 所示结果。

将图 3 中每条曲线直线段部分的斜率, 即关联维

数提取出来,得到 $m-d_m$ 关系如图 4 所示,可知随着嵌入维数 m 增加,关联维数 d_m 趋于稳定值 $d \approx 4.6$ 。根据 Takens 嵌入定理有 $m \geq 2d+1$,可以取嵌入维数 $m=11$ 。

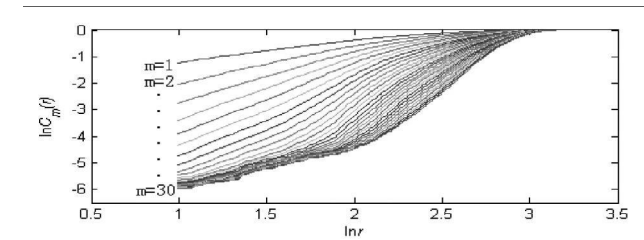


图 3 不同嵌入维数下的 $\ln r-\ln C_m(r)$ 关系图

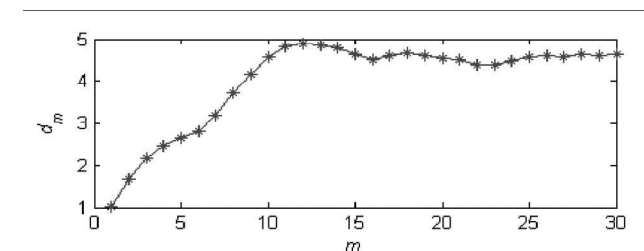


图 4 关联维数与嵌入维数关系

在使用前述算得的嵌入维数 $m=11$ 及时间延迟 $\tau=6$ 重构相空间的基础上,使用原 Volterra 自适应预测法以及前面提出的改进方法对第 30 天的风速进行预测,预测结果如图 5 所示。

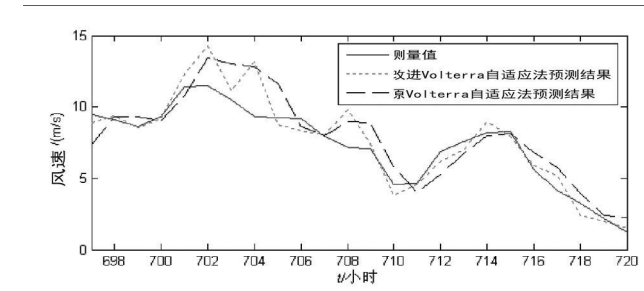


图 5 两种方法的预测结果比较

表 1 不同预测方法的性能比较

	原 Volterra 自适应预测法	改进 Volterra 自适应预测法
平均误差 (%)	18.97	11.87
最大误差 (%)	83.21	41.28

两种预测方法的预测性能列于表 1 中。由表 1 可见, Volterra 自适应预测法比现有其他风速预测方法的精度有所提高,且所提改进 Volterra 自适应预测法一定程度上提高了原方法的预测精度。

4 结 论

在对风速时间序列进行相空间重构的基础上,提出一种改进的 Volterra 自适应预测法进行了风速预

测,该方法使用一种新的滤波系数训练更新方法。通过与原方法的预测结果进行对比,验证了所提改进方法能一定程度上提高风速预测的精度。混沌预测方法在理论上保证了看似随机性很强的风速序列在短期内是可预测的,且只使用风速历史数据进行预测,实现简便、成本低;与其他智能预测算法相比,计算量小、可靠性高。因此具有较强实际应用潜力,值得进一步研究。

参考文献

[1] 杨秀媛,肖洋,陈树勇.风电场风速和发电功率预测研究[J].中国电机工程学报,2005,25(11):1—5.

[2] 谷兴凯,范高峰,王晓蓉,等.风电功率预测技术综述[J].电网技术,2007,31(增刊2):335—338.

[3] 吴兴华,周晖,黄梅.基于模式识别的风电场风速和发电功率预测[J].继电器,2008,36(1):27—32.

[4] Bart C Ummels Madeleine Gibescu Engbert Pelgum, et al Impacts of Wind Power on Thermal Generation Unit Commitment and Dispatch [J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2007, 22(1): 44—51.

[5] 潘迪夫,刘辉,李燕飞.基于时间序列分析和卡尔曼滤波算法的风电场风速预测优化模型[J].电网技术,2008,32(7):82—86.

[6] George Sideratos Nikos D Hatziaargyriou An Advanced Statistical Method for Wind Power Forecasting [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2007, 22(1): 258—265.

[7] 丁明,张立军,吴义纯.基于时间序列分析的风电场风速预测模型[J].电力自动化设备,2005,25(8):32—34.

[8] 温权,张勇传,程时杰.负荷预报的混沌时间序列分析方法[J].电网技术,2001,25(10):13—16.

[9] Ioannis G Damousis Minas C Alexiadis John B Theodoridis A Fuzzy Model for Wind Speed Prediction and Power Generation in Wind Parks Using Spatial Correlation [J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2004, 19(2): 352—361.

[10] 王丽婕,廖晓钟,高爽,等.并网型大型风电场风力发电功率一时间序列的混沌属性分析[J].北京理工大学学报,2007,27(12):1077—1080.

[11] 韩敏.混沌时间序列预测理论与方法[M].北京:中国水利水电出版社,2007.

[12] 张家树,肖先赐.混沌时间序列的 Volterra 自适应预测[J].物理学报,2000,49(3):403—408.

[13] Chunfu Li Juebang Yu Volterra-TLS Method for Chaotic Time Series Prediction [C]. International Conference on

部分传递的热量大部分被蒸汽带走,转子的温度梯度最终应与各级后的蒸汽温度梯度基本一致。对于汽缸而言,蒸汽对汽缸的换热系数应小于蒸汽对转子的换热系数,汽缸与蒸汽的换热面积也相对转子小,即蒸汽对汽缸的冷却作用相对较弱,汽缸自高温部分向低温部分传递的热量较少被蒸汽带走,导致各级汽缸的温度应高于对应的蒸汽温度,汽缸的平均温度高于转子的平均温度,最终的结果是汽缸的绝对膨胀量大于转子的绝对膨胀量,产生负胀差。

2 消除负胀差大的措施

2.1 减小前汽封漏汽对汽缸的加热作用

如果汽封漏汽压力小于或接近抽汽口压力,漏汽就直接被带入加热器而不会返回汽缸,特提出了对漏汽管道进行改造的方案(如图 2)。

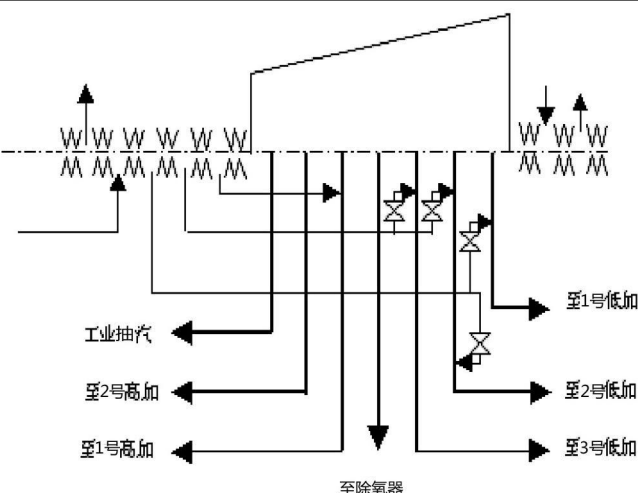


图 2 汽轮机抽汽及轴封漏示意图

- (1)将前汽封原三档漏汽至 6 抽(1号低加)增加一路到 5 抽(2号低加)并安装截止阀;
- (2)将前汽封原二档漏汽至 5 抽(2号低加)另增加一路到 4 抽(3号低加)并安装截止阀。

(3)考虑到原汽封漏汽排放点离抽汽口太近,可将漏汽与抽汽管道汇合点下移。

在运行中改变前汽封漏汽的排放方式,关闭原漏汽至 1 号、2 号低加的截止阀,将三档漏汽排至 5 抽,二档漏汽排至 4 抽。并通过新增的截止阀进行排放量的控制,尽量减少汽封漏汽对汽缸的加热作用。

2.2 提高前轴封汽源温度

该机组原设计轴封供汽的方式为:空负荷采用来自低压减温减压蒸汽(温度约 $180 \sim 250^{\circ}\text{C}$),大负荷采用来自除氧器汽平衡管的饱和蒸汽(温度约 140°C)进入均压箱,由轴封供汽母管分别向前、后轴封供汽,即前、后汽封供汽温度相同。则提出在运行中轴封供汽尽可能采用低减来的蒸汽,保证均压箱的温度在 180°C 左右,因为提高前轴封的供汽温度是减少负胀差的有效方法。

2.3 降低调节级后蒸汽温度

降低调节级后蒸汽温度,可降低调节级后汽缸金属温度,减少汽缸的绝对膨胀量,可有效减少负胀差。由于该机组为非标机组,是在原武汉汽轮机厂 50 MW 抽汽机组改造而来,改造后各级动叶及隔板都发生了很大变化,使调节级做功能力不够,造成焓降不够。汽轮机制造厂应重新计算、设计调节级的工作参数。但改造调节级工作量太大,只有待机组大修时再作处理。

3 结 论

经过对轴封漏汽管道改造和运行优化后,2 号机组负胀差得到了很好的改善,在正常运行中,胀差可维持在 $-0.4 \sim +0.2 \text{ mm}$,未再出现负胀差超限现象,同时机组的热膨胀在 12 MW 稳定时从 15 mm 也降到了 13 mm。

(收稿日期:2008—12—09)

(上接第 19 页)

Communications Circuits and Systems 2008. ICCAS 2008. 25—27 May 2008. Page(s): 48—51.

- [14] Y. S. Zhang D. B. Li Volterra adaptive prediction of multipath fading channel[J]. Electronics Letters 1997, 33(9): 754—755.
- [15] 郭双冰,肖先赐.混沌时间序列的 Volterra 自适应预测滤波器定阶[J].电子与信息学报,2002,24(10): 1334—1340.

- [16] 茅于海,苗家林.自适应预测滤波器的一种新算法[J].电子学报,1983,11(5): 75—81.

作者简介:

罗海洋(1984—),男,硕士研究生,研究方向为电力系统稳定与控制、电力系统调度自动化;

刘天琪(1962—),女,教授,博士生导师,主要研究方向为电力系统分析计算与稳定控制、高压直流输电、调度自动化;

李兴源(1945—),男,教授,博士生导师,主要研究方向为电力系统稳定与控制、高压直流输电、分散式发电。

(收稿日期:2008—12—25)

异步风力发电机稳态模型研究

顾 威, 李兴源, 魏 巍

(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘 要:可靠、清洁的能源供应是现代社会发展与进步的保障, 面对日益严重的能源危机, 风能逐渐成为新的替代能源。风力发电与一般的能源发电有着很大的区别, 其最大的一个特点是风速有很大的随机性, 如果并网的风力发电机容量较大, 则将对电网有较大影响。因而需要对包含有风电场的电力系统进行潮流计算, 以分析风电场引起的电网电压和功率的变化。在此所研究的 PQ 模型是分析风电场的最基本也是最常用的模型。一般风力发电机的等值模型有三种: PQ 模型、RX 模型和简化 RX 模型。其中 PQ 模型又有不计及转差的 PQ 模型和计及转差的 PQ 模型这两种。在不要求较高精确度的情况下 PQ 模型实用性很强, 因此研究风力发电机的 PQ 模型有很大意义。

关键词:异步风力发电机; 稳态 PQ 模型; 潮流计算; VC++

Abstract The energy source supply which is credible and clean is the guarantee of development and advancement of modern society. Because of energy sources crisis, wind energy is becoming a new replaceable energy. The most obvious characteristic of wind power is that wind speed has the randomness. As a result, if the capacity of wind power is too large, it will have a great impact on the grid. So the power system flow should be calculated to analyze the change of voltage and power which is caused by the wind power. PQ model is the most used one to analyze wind power. Generally, wind power generators have three equivalence model: PQ model, RX model and simplified RX model. Among them, there are PQ model with slip and PQ model without slip. When the precision is not important, PQ model is very practical. So it has an important meaning to investigate PQ model.

Key words: asynchronous wind generator; steady-state PQ model; power flow calculation; VC++

中图分类号: TM743 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)03-0020-05

25年前,世界上安装了第一台风力发电样机,自那以后,风能的开发走过了漫长的历程。二十多年来,风电技术的发展不断加快,风电场的规模不断扩大。今天,全球都面临着能源挑战,气候的变化、能源需求的日益增长、能源安全问题等得到了广泛的关注。风电能帮助人们应对这些问题,可以说风能是现代社会成熟的最具效率的能源技术之一。

风力发电技术的发展趋势是:①单机容量不断扩大,利用率逐渐提高;②机组桨叶增长,具有更大的捕捉风能的能力;③塔架高度上升;④变桨距调节方式迅速取代失速功率调节方式,变速恒频并网机组能随风速大小随意旋转;⑤海上风力发电的技术取得巨大进展。随着风电技术水平的不断提高,经济性也在逐步提高^[1~5]。

1 异步风力发电机的模型

风电场接入电力系统后,将会影响局部电力系统的潮流分布和电压水平。由于风电场的处理随机变化,因此将造成线路功率和节点电压的波动。当风电场的容量较大时,应当分析风电场引起的节点电压变化,校验是否会出现线路功率和节点电压越限现象等。在确定风电场的并网方案时,需要对含风电场的电力系统进行潮流计算。目的在于防止风电场引起所接入系统出现线路功率越限或者节点电压越限;同时防止风电场中的风电机组因端电压过低或者过高而使电压保护装置动作,造成非正常停机,从而损失发电量^[6~8]。

风电场的接入也会对系统的频率造成影响,但是现代风机一般是由风力机驱动交流发电机经变频装置与电网并联(见图1)。在这种系统中,由于交流发电机是通过整流-逆变装置与电网连接,发电机的频率与电网的频率是彼此独立的,因此通常不会发生因频率相差较大而导致网络频率严重下降或上升的问题。

基金项目:国家重点基础研究专项经费项目(2004CB217901);
国家科技支撑计划项目(2008BAA13B01)

用风场降解等值模型时,在潮流计算中将其等值为 PQ 节点或者 RX 节点是最常见的两种方式,也有等值成 PX 节点的情况。使用 PQ 节点模型时,节点的有功和无功功率均为定值,认为风电机组中电容器组的自动分组投切,可以使风电场的功率因数保持不变。根据风机的有功功率输出特性确定出有功功率,无功功率可相应得出。

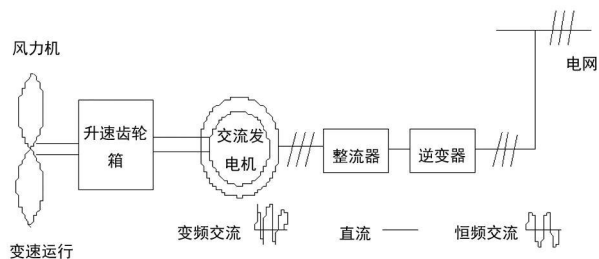


图 1 风力机驱动交流发电机经整流-逆变装置与电网连接图

异步电机作为发电机运行时,其功率传递关系与电动机相反。自然风吹动风轮机叶片,将风能转化为机械能,由此获得的机械功率扣除掉机械损耗后即传递到异步发电机转子上的机械功率 P_Ω 。在 P_Ω 中扣除转子铜耗和定子铜耗,忽略铁心损耗,得到注入电网的电功率 P_e 。

为简化计算,异步发电机采用 Γ 形近似等效电路。所忽略定子电阻 R_s 和铁心损耗 P_{Fe} ,又由于 $X_m \gg X_s$ (X_s 为励磁电抗, X_s 为定子电抗),故可将励磁支路移至电路首端,得到简化的异步发电机 Γ 型等值电路,如图 2 所示。因此,注入电网的功率 P_e 就是电磁功率 P_m ,即电阻 R_r/s 上的电功率。

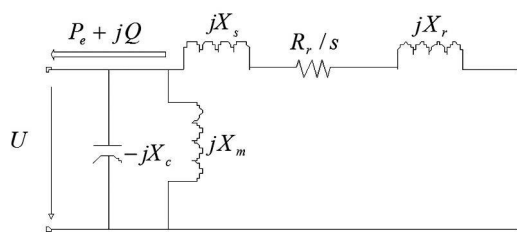


图 2 异步电机 Γ 型等值电路

1.1 计及转差的 PQ 模型

根据图 2 的电路关系可得:

$$P_e = \frac{-U^2 R_r / s}{(R_r / s)^2 + X_k^2} \quad (1)$$

式中, $X_k = X_s + X_r$ 。经计算得到:

$$s = \frac{U^2 R_r - \sqrt{U^4 R_r^2 - 4 P_e^2 X_k^2}}{2 P_e X_k^2} \quad (2)$$

由等效电路可见,异步发电机的功率因数角 φ 与滑差 s 的关系为:

$$\varphi = \arctan \left[\frac{R_r^2 + X_k (X_k + X_m) s^2}{R_r X_m S} \right] \quad (3)$$

由此可知,异步发电机的无功功率 Q_e 与有功功率 P_e 之间的关系为:

$$Q_e = \frac{R_r^2 + X_k (X_k + X_m) s^2}{R_r X_m S} P_e \quad (4)$$

考虑到并联补偿电容,故有流入到电网中的风电场无功为 $Q = Q_c + Q_e$,其中 $Q_c = -U^2 / X_c$ 。

如果采用异步电机,进行潮流计算时必须考虑风电机组本身的特点:①异步发电机本身没有励磁装置,它要靠电网提供无功功率来建立磁场,因此它没有电压调节能力,不能像常规同步发电机那样把它视为电压幅值恒定的 PV 节点;②异步发电机在输出有功功率的同时还要从系统吸收一定的无功功率,其无功功率的大小与滑差 s 和节点电压 U 的大小有密切的关系,因此也不能简单地把它视为功率恒定的负荷节点,即 PQ 节点^[9~15]。因此,在计算含有风电场的电力系统潮流时,必须考虑风电机组的数学模型,将其扩展到系统的功率方程中,进行联立求解,或者将系统功率方程和描述风电机组数学模型的方程进行交替迭代求解,计算的流程如下。

(1)给定风电场输出的有功功率 P_e ,设定风电场节点的电压初值为 U ;

(2)由 P_e 和 U 根据式 (2) 计算风电机组的滑差 s ;

(3)由 P_e 、 U 和 s 利用式 (4) 计算无功功率 Q ;

(4)将风电场节点视为 PQ 节点求解整个系统的潮流,从而得到风电场节点电压的更新值 U' ;

(5)如果 $|U' - U| > \epsilon$,则令 $U = 0.5(U + U')$,返回步骤 (2) 继续执行步骤 (2)~(4),直到两次所得电压之差在规定误差范围之内,即 $|U' - U| < \epsilon$ (ϵ 为设定的精确度)。

电磁功率 P_e 与风速的三次方有关,下面将作详细说明。

1.2 不计及转差的 PQ 模型

风轮从风中吸收的功率可以用下面的公式表示:

$$P_e = \frac{1}{2} \rho A v^3 C_p \quad (5)$$

式中, P_e 为风轮输出的功率; C_p 为风轮的功率系数,

也称为风力机的利用系数; A 为风轮扫掠面积; ρ 为空气密度; v 为风速; R 为风轮半径。

其中 C_p 是叶尖速比 λ ($\lambda = \omega R / v$, ω 是风轮角速度, R 是风轮半径) 和桨距角 θ_p 的函数 $C_p(\theta_p, \lambda)$ 。

众所周知, 如果接近风力机的空气全部动能都被转动的风能叶片所吸收, 那么风轮后的空气就不动了, 然而空气不可能完全停止, 所以风力机的效率总是小于 1。

一般认为风电机组中电容器自动分组投切, 且补偿理想, 使风电场的功率因数不变, 有:

$$Q = P / \tan \varphi \quad (6)$$

φ 为并网风电场的功率因数角。而由于风力发电机使用的是异步发电机, 所以 φ 一般位于第四象限, $\tan \varphi$ 为负, P 是发出的有功功率, Q 是吸收的无功功率。 P 和 Q 方向相反。

在电力系统潮流计算中, 风电场的准确计算方法是根据异步电机的稳态等值电路, 计算出风电场在不同风速和系统电压水平下吸收的无功功率以及并联电容器组补偿的无功功率。异步电机稳态等值电路如图 3 所示。

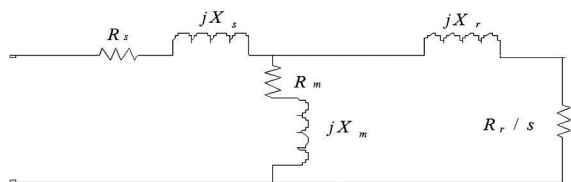


图 3 异步电机的稳态等值电路

其中 R_s 、 X_s 为定子电阻和电抗, R_r 、 X_r 为转子电阻和漏抗, R_m 、 X_m 为励磁支路电阻和电抗。 s 为转差, 在发电机运行状态下为负值。

将无功功率 (消耗为正) 表示为:

$$Q = U^2 \frac{X_c - X_m}{X_c X_m} + X \frac{U_2 + 2RP}{2(R^2 + X_k^2)} - X_k \frac{\sqrt{(U^2 + 2RP)^2 - 4P^2(R^2 + X_k^2)}}{2(R^2 + X_k^2)} \quad (7)$$

式中, U 为机端电压, P 是有功功率, X_k 为定子和转子的漏抗之和, X_c 为电容器组的电抗, X_m 为异步电机的励磁电抗, R 为定子和转子的电阻之和。

根据 MCLAURIN 多项式原则, 同时忽略异步电机的电阻, 可以将上式简化为:

$$Q \approx U^2 \frac{X_c - X_m}{X_c X_m} + \frac{X_k}{U^2} P_e^2 \quad (8)$$

由式 (5) 和式 (8) 可知, 该模型的有功功率只与风速有关, 其无功功率只与机端电压和有功功率有关。

其计算步骤如下:

(1) 给定风电场输出的有功功率 P_e , 设定风电场节点的电压初值为 U ;

(2) 由 P_e 和 U 根据式 (8) 计算风电机组的无功功率 Q ;

(3) 将风电场节点视为 PQ 节点求解整个系统的潮流, 从而得到风电场节点电压的更新值 U' ;

(4) 如果 $|U' - U| > \epsilon$, 则令 $U = U'$, 返回步骤 (2) 继续执行步骤 (2) ~ (3), 直到两次所得电压之差在规定误差范围之内, 即 $|U' - U| < \epsilon$ 。

2 异步风力发电机的潮流计算

VC++ 是一种功能比较强大的计算机高级程序设计语言, 由于程序设计较为方便简洁, 运算速度快, 因而适合于用来进行潮流计算。

首先是根据潮流图按 PQ 节点、PV 节点和平衡节点的顺序定下节点编号, 给出电压初值, 依照节点编号顺序形成一个导纳矩阵 Y 。计算出风电场所在节点的有功功率值^[16]。

其次是按极坐标形式下的牛顿迭代法计算出所有 PQ 节点和 PV 节点的 ΔP 和 PQ 节点的 ΔQ 的值, 接着求出 N、H、K、L 矩阵以形成雅克比矩阵。

再次, 利用求逆程序求出雅克比矩阵的逆矩阵, 得到雅克比矩阵的逆矩阵后可以求出每个节点的 $\Delta \theta$ 和 ΔV 的值, 进而得到除平衡节点以外的所有节点的电压幅值和相位。

最后, 比较两次电压值的差值, 若小于设定的精确度就停止迭代, 否则将一直迭代下去直到满足停止条件。

需要说明的是, 在潮流程序中所有使用的值都是标么值, 因而得到的电压幅值基本上都接近于 1, 处于额定值附近, 这说明系统的电压是稳定的, 不会因为风电场的接入而导致电压崩溃, 且系统是收敛的。

精确度则可以任意更改, 为得到较为精确的结果, 计算时的精确度选为 0.000 01, 即 $|U' - U| < 0.000 01$ 时迭代结束。

计算所用到的电力系统图是一个 5 节点图, 如图 4 所示。

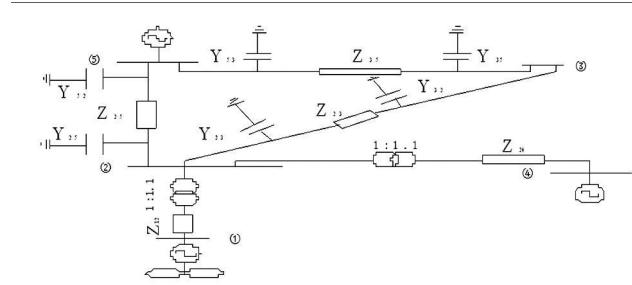


图 4 含风电场的系统图

该系统参数如表 1。

表 1 系统参数

名称	数值
Z12	j0.20
Z23	0.10+j0.40
Z24	j0.30
Z25	0.12+j0.50
Z35	0.08+j0.40
Y23	j0.01528
Y32	j0.01528
Y25	j0.01920
Y52	j0.01920
Y35	j0.01413
Y53	j0.01413
P ₁	由风速决定
Q ₁	由电压决定
P ₂	0
Q ₂	0
P ₃	-0.55
Q ₃	-0.13
P ₄	0.5
V ₄	1.10
V ₅	1.05
θ ₅	0

单台风电机组电气参数见表 2。

表 2 单台风电机组电气参数

名称	数值
额定容量 /kW	600
转子电阻 R _r /pu	0.00373
定子电阻 R _s /pu	0.00306
励磁电阻 R _m /pu	0.0284
额定电压 /kV	0.69
定子电抗 X _s /pu	0.09985
转子电抗 X _r /pu	0.10906
励磁电抗 X _m /pu	3.54708
额定转差 s _N	-0.004
功率因数	0.89
风能利用系数 C _p	0.1217
扫掠面积 A/m ²	2124
空气密度 ρ/(kg/m ³)	1.06
额定风速 v/(m/s)	16

(计算所用的功率基准值为 100 MVA, 电压为额定电压值)

其余节点设定的电压初始值见表 3。

表 3 其余节点初始电压值

名称	数值
V ₁	1.0
θ ₁	0
V ₂	1.0
θ ₂	0
V ₃	1.0
θ ₃	0
θ ₄	0

计及转差的 PQ 模型迭代了 14 次后收敛。以下给出最终迭代的结果如表 4。

表 4 14 次最终迭代结果

迭代次数	节点编号	电压幅值	电压相位	有功功率	无功功率
14	1	0.9155	0.1063	0.0561	-0.0281
	2	1.0139	0.0930	0	0
	3	0.9780	-0.0599	-0.55	-0.13
	4	1.1	0.2156	0.5	-1.1012
	5	1.05	0	0.3581	4.5869

不计及转差的 PQ 模型迭代了 4 次后收敛。以下给出最终迭代的结果见表 5。

表 5 4 次最终迭代结果

迭代次数	节点编号	电压幅值	电压相位	有功功率	无功功率
4	1	0.9137	0.1066	0.0561	-0.0333
	2	1.0132	0.0933	0	0
	3	0.9776	-0.0599	-0.55	-0.13
	4	1.1	0.2159	0.5	-0.2419
	5	1.05	0	0.0876	0.9446

由于不计及转差的算法是直接将新得到的电压幅值代入下一次迭代计算中, 即 $U=U'$ 将代入迭代, 计及转差的算法是前一次和新得到的电压幅值相加后乘 0.5 之后的值代入下一次迭代计算中, 即 $U=0.5(U+U')$ 代入迭代, 所以不计及转差的算法要比计及转差的算法快很多, 迭代次数要少。

如果将计及转差的算法代入电压也改成 $U=U'$, 则同样的系统计及转差的 PQ 模型迭代次数也是 4 次, 最终结果如表 6。

表 6 最终结果

迭代次数	节点编号	电压幅值	电压相位	有功功率	无功功率
4	1	0.9155	0.1063	0.0561	-0.0281
	2	1.0139	0.0930	0	0
	3	0.9780	-0.0599	-0.55	-0.13
	4	1.1	0.2156	0.5	-0.2607
	5	1.05	0	0.0866	0.9297

结果表明, 计及转差的 PQ 模型和不计及转差的

PQ 模型结果都相差不大,在有风力发电机的节点 1,计及转差的模型电压为 0.915 544,而不计及转差的模型电压为 0.913 693,两者都接近于 1。

风电场的加入对系统的影响不是很大,系统仍可以保持稳定,皆是收敛的。而两种 PQ 模型所得到的结果大体一致,只是计及转差的 PQ 模型算出的节点 1 的电压比不计及转差的 PQ 模型的节点 1 的电压要稍稍高一些,但都接近于 1,因而这两种 PQ 模型都是可行的。

3 结 论

风力发电机组是一种特殊的发电设备,它的并网运行对电网的电能质量以及安全稳定运行构成一定的威胁,主要表现为对电网频率和节点电压的影响,由于风力发电机一般是通过整流—逆变装置与电网连接,对频率影响不大,因此在风电场规模不断扩大的形势下,尤其要校验是否会出现线路功率和节点电压越限现象等,这就需要一种比较简单方便又不失精确的稳态模型,以对含风电场的电力系统进行潮流计算,得到准确的潮流计算结果,检验风电场的并入对电网电压的影响。因此,提出了风力发电机的 PQ 模型,而 PQ 模型又分为计及转差的 PQ 模型和不计及转差的 PQ 模型。在不强求太高精确度的工程计算中,PQ 模型是一个实用的选择。

在此提出了 PQ 模型的两种算法,用两个系统进行了两次验证,计算出的电压值都证明了两个 PQ 模型都可以得到较为准确的结果。

参考文献

- [1] 李俊峰. 风力 12 在中国 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- [2] 张希良. 风能开发利用 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- [3] 王承煦, 张源. 风力发电 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2003.
- [4] 叶杭冶. 风力发电机组的控制技术 (第二版) [M]. 机械工业出版社, 2006.
- [5] 刘家钰. 电站风机改造与可靠性分析 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.
- [6] Andres E. Feijoo, Jose Cidras. Modeling of wind farm in the load flow analysis [J]. IEEE Transaction on Power System, 2000, 15(1): 110—115.
- [7] C. R. Fuerte-Esquivel, J. H. Tovar-Hernandez, G. Gutierrez-Alcaraz. Discussion of “Modeling of Wind Farms in the Load Flow Analysis” [J]. IEEE Transaction on Power System, 2001, 16(4): 951—952.
- [8] 徐娇, 李兴源. 异步风力发电机组的简化 RX 模型及其潮流计算 [J]. 电力系统自动化, 2008, 32(1): 22—25.
- [9] 吴俊玲, 周双喜, 孙建锋, 等. 并网风力发电场的最大注入功率分析 [J]. 电网技术, 2004, 28(20): 28—32.
- [10] 申洪, 王伟胜, 戴慧珠. 变速恒频风力发电机组的无功功率极限. 电网技术, 2003, 27(11): 60—63.
- [11] CHOWDHURY A. A. Reliability models for large wind farms in generation system planning // Proceedings of IEEE Power Engineering Society General Meeting Vol 2, Jun 12-16, 2005, San Francisco, CA, USA: 192621933.
- [12] LUBOSNY Z. Wind turbine operation in electric power system. New York, N Y, USA: Springer Verlag, 2003.
- [13] FEIJOO A E, CIDRAS J. Modeling of wind farm in the load flow analysis. IEEE Trans on Power Systems, 2000, 15(1): 110—115.
- [14] ZHU Y, TOMSOVIC K. Adaptive power flow method for distribution systems with dispersed generation. IEEE Trans on Power Delivery, 2002, 17(3): 8222827.
- [15] 吴义纯. 含风电场的电力系统可靠性与规划问题的研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2006.
- [16] 邱晓燕, 刘天琪. 电力系统分析的计算机算法 [M]. 成都: 四川大学出版社, 2004.

作者简介:

顾 威, 女, 硕士研究生, 主要研究方向: 电力系统稳定与控制及分布式发电。

李兴源, 男, 博士生导师, 中国电机工程学会理事, IEEE 高级会员, 主要研究方向: 电力系统稳定和控制。

魏 巍, 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 电力系统稳定与控制及分布式发电。

(收稿日期: 2009—02—23)

欢迎订阅《四川电力技术》

基于 pscad 变桨距风力发电系统的建模仿真

张 尧, 王维庆, 李 锋, 潘俊强

(新疆大学电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830008)

摘 要:首先从风力发电的数学建模说起。应用 PSCAD/EMTDC 软件, 以风机各部分数学模型为基础搭建了变桨距风力发电系统模型。分别在恒定风速叠加阵风、随机风情况下, 仿真变桨距风力发电机组的输出有功和无功以及发电机转速的变化。仿真结果表明变桨距风电机组具有良好的运行特性, 为今后的建模和仿真研究提供一定的借鉴。

关键词: PSCAD/EMTDC; 变桨距; 建模

Abstract: The basic structure of the variable pitch wind power system model is established based on the various parts of the mathematical model using PSCAD/EMTDC software. The output active and reactive power of the variable pitch wind turbine as well as the speed changes of generator are simulated in the superimposed gust wind speed and in the constant random wind case respectively. The simulation results show that the variable pitch wind turbine has good operating characteristics which gives a reference for the future modeling and simulation research.

Key words: PSCAD/EMTDC; variable pitch; modeling

中图分类号: TM743 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)03-0025-03

某学者分析了变桨距型和大型失速型风力机的结构特点, 采用力矩平衡关系, 建立了风力发电机组在标称状态下的数学模型, 但是忽略了机组的不确定性部分, 将其放入到系统的控制器中考虑。由于风力发电系统的复杂性, 建立的机理与实际有一定的偏差。Bongers 等开始利用实验数据, 通过系统辨识的方法来得到风力机的模型。Bongers 采用系统辨识方法取得了较好的结果, 但是对系统辨识方法的尝试并不仅限于此。由于实验测试法建模分为两类: 一是被建模系统的某些特征可用系统的可测输出与输入间的关系来描述, 即为系统辨识方法 (System Identification), 另一是被建模系统的输出可测, 但是其输入却难以定义或难以测量, 即为随机建模或者时间序列建模方法 (Stochastic Modeling), 此模型处理大数现象, 它所反映的实体对象具有随机性或必然性, 反映的是机遇律^[10]。

近年来, 随着风力发电机组设计水平不断提高, 在大型风力发电机组, 特别是兆瓦级机组的设计中, 采用变桨距风轮, 桨叶与轮毂不再采用刚性连接, 而通过可转动的推力轴承或专门为变距机构设计的联轴器连接。这种风轮可根据风速的变化调整气流对叶片的攻角, 当风速超过额定风速后, 输出功率可

稳定地保持在额定功率上, 特别是在大风情况下, 风机处于顺桨状态, 使桨叶和整机的受力大为改善, 这对大型风力发电机组的总体设计十分有利。

Pscad/em tdc 为电力研究控制系统开发的优秀仿真工具, 具有模块化、可重载、可封装、面向结构图编程及高度可视化等特点, 与编程仿真软件相比应用十分方便。Pscad/em tdc 提供了丰富的风机元件、电机元件模块库供建模仿真使用。

1 变桨距风力发电机组的数学模型

1.1 风速模型

风速是一个典型的随机变量。若不考虑风的方向性, 风速是其空间坐标位置和时间的函数, 即 $v = f(x, y, z, t)$ 。在现在的研究中普遍采用的风速模型是四种风速: 恒风模型、阵风模型、渐变风模型、随机风模型。

1.2 风机模型

风机是风力发电系统中能量转换的首要部件, 它用来截获流动空气所具有的动能, 并将风机叶片迎风扫掠面积内的一部分动能转换为机械能。它不仅决定了整个风力发电系统的有效输出功率, 而且直接影响机组的安全、稳定、可靠运行, 是风力发电系统中关键部件之一。

基金项目:教育部博士点专项基金项目 (20060755001); 自治区高校高新技术研究重点项目 (XJEDU2004104)

发电系统的关键部分,为了使变桨距系统能安全、稳定的运行,必须在变桨距系统实际立机运行前,对其运行特性、控制规律有充分的了解。这种控制规律在建模仿真中其本质就是控制算法,也就是数学模型。在建模中变桨距控制部分采用 PID 算法。各个部分模型在前面已经完成。有机组合时需要一些外围电路形成闭环。

3 变桨距风力发电系统的仿真与分析

分别在恒定风速叠加阵风、随机风情况下,仿真风力发电机组的输出有功和无功以及发电机转速的变化。

3.1 在恒定风速叠加阵风时,发电机组仿真的情况

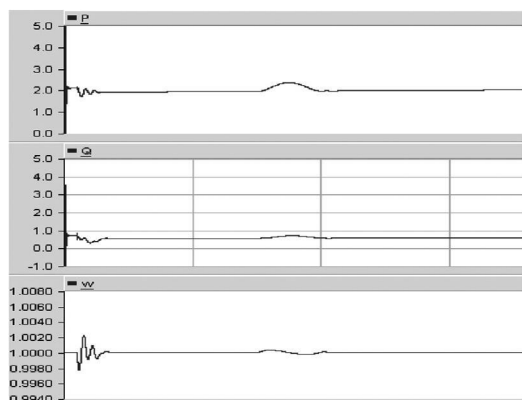


图 5 发电机输出的有功无功转速变化图

发电机开始时有功无功的波动是启动时的自我调整。当风速发生变化时,发电机的转速也发生变化,使得发电机的输出有功和无功也发生变化。变桨距控制部分接收到发电机变化的转速会立刻调节桨距角使发电机的转速稳定,这样发电机的输出有功无功就会很快稳定下来并且变化不大。

3.2 随机风时风电机组仿真的情况

施加随机风时,由于风速的大小是随机变化的,且变化率很大,所以在仿真中,发电机的输出有功和无功都发生了很大变化,输出有功虽然发生变化,但是一直保持在额定功率附近。

4 结 论

定桨距型风力机,桨叶节距角不可调节,没有闭环的转速控制回路。这种类型的风力机的代表是失速型风力机,在大风速的情况下,它利用失速现象,使

风力机所产生的电能基本保持为常数并且减少桨叶中的气动负荷。

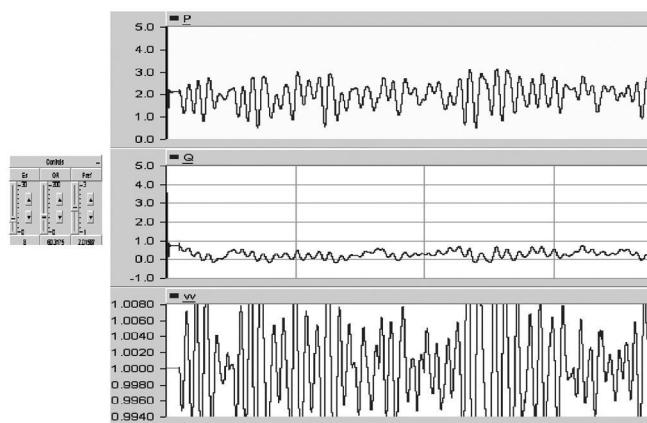


图 6 发电机输出的有功无功转速变化图

而变桨距结构是利用转速、功率的实际值与额定值做差经过 PI 控制器来实现闭环的桨距角的控制。变桨距调节方法的主要优点是可大范围调节转速,使功率系数保持在最佳值,从而最大限度地吸收风能,效率高;能吸收和存储阵风能量,可减少阵风冲击对风力发电机产生的疲劳损坏、机械应力和转矩脉动,延长机组寿命,减小噪声;而且还可控制有功功率和无功功率,改善电能质量。

参考文献

- [1] 贺益康,郑康,潘再平.交流励磁变速恒频风电系统运行研究[J].电力系统自动化,2004,28(13):55—59.
- [2] 董萍.风力发电系统的建模、控制及其仿真研究[D].华南理工大学硕士学位论文,2005,5.
- [3] 李长青,丁立新,等.仿真技术在风力发电系统中的应用[C].中国风能技术论坛,2005,9.
- [4] 齐欢,王小平.系统建模与仿真[M].北京:清华大学出版社,2004.
- [5] 叶杭冶.风力发电机组的控制技术[M].北京:机械工业出版社,2002,3.
- [6] 易继锴,侯媛彬.智能控制技术[M].北京:北京工业大学出版社,1999,9.
- [7] 王承煦.风力发电实用技术[M].北京:金盾出版社,1995.
- [8] 王春行.液压伺服控制系统[M].北京:机械工业出版社,1981.

作者简介:

张 尧(1982—),女,硕士研究生,主要研究方向:变速恒频风力发电机组的研究。

王维庆(1959—),男,教授,博士生导师,主要研究方向:电力系统自动化和风力发电机组的智能控制。

(收稿日期:2009—03—20)

黑启动过程中操作过电压分析

刘连志¹, 赵 灿², 韩振明³

(1. 华北电力大学, 河北 保定 071003; 2. 保定供电公司, 河北 保定 071000;

3. 沧州电力公司, 河北 沧州 061001)

摘 要:在制定电力系统黑启动方案过程中,为验证方案的可行性,需要对黑启动方案进行各项技术指标(发电机的自励磁、空充线路过电压、频率和电压稳定问题等)的校验,以便成为黑启动方案的备选方案,其中空载线路合闸操作过电压的校验便是其中较为重要的一项。对电力系统黑启动过程中的操作过电压问题进行了理论分析,并用 MATLAB/SMULINK 软件进行仿真,将计算结果和仿真结果进行了对比,证明了在黑启动恢复过程中对空载线路进行合闸操作存在过电压的可能,最后结合河北南网的实际情况,用河北南网的某一黑启动方案进行验证,证明了理论分析的正确性,同时提出了抑制空载线路过电压的措施。

关键词:黑启动;空载线路;过电压;SMULINK 仿真

Abstract: During working out the black-start scheme of power system, in order to prove the feasibility of the scheme, the verification of different technical criteria should be carried out for black-start scheme, including generator self-excitation, unload line overvoltage, frequency and voltage stability and so on. With the aim of becoming one of the feasible black-start plans, the verification of switching overvoltage in unloaded line is one of the important verification. The theoretical analysis on switching overvoltage during the black-start of power system is carried out. A simulation is carried out with MATLAB/SMULINK software. The simulation results are compared with the calculating results. The results show that the overvoltage theoretical analysis has proved correct, and during black-start this operation will lead to overvoltage probably. Finally, taking the south power system of Hebei province for example, it proves the theoretical analysis correct, and the measures to suppress the overvoltage of unloaded line are proposed.

Key words: black-start; unloaded line; overvoltage; SMULINK simulation

中图分类号: TM864 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)03-0028-03

近年来,全世界范围内大规模的停电事故时有发生,造成了巨大的经济损失和社会影响。如何在系统大面积停电后快速安全地完成系统的恢复重建,是目前电力系统研究的一个热点。制定系统在大停电后的黑启动方案便是解决这个问题的一种有效方法^[1,2]。在大停电事故后,调度员可在黑启动方案的指导下,及时、快速、稳定地实现对电力系统的恢复。电力系统的黑启动涉及电力系统运行的许多方面,例如自励磁、合闸过电压、静态稳定与低频振荡、电压与频率稳定性等。在制定黑启动方案的过程中要对启动电源和启动路径进行选择,因此大量空充线路过电压的仿真计算是必不可少的,黑启动是在整个系统全停后进行的自救和恢复,整个过程中电力系统处于十分薄弱的状态,任何微小的偏差和扰动都有可能造成黑启动的失败。因此制定后的黑启动方案需要经过严格的审核和仿真校验方能实施。其中,对空载线路

合闸过电压的校验是黑启动方案校验的重要组成部分。空载线路合闸过电压属于电磁暂态的范畴^[3],黑启动初期要通过输电线路对被启动电厂的厂用电母线进行充电,这一运行方式和电网的正常运行方式差别很大有其自身的特殊性,下面对空充线路过电压的原理进行了分析,并用 MATLAB/SMULINK 软件对示例系统进行了仿真计算,并提出了抑制空充线路过电压的措施。

1 电力系统黑启动操作过电压分析

电力系统中具有许多的感性和容性元件组成复杂的振荡回路,当进行操作或发生故障时,电力系统从一种稳定工作状态通过振荡转变到另一种稳定工作状态,在此过渡过程中将会产生暂态性质的过电压,称为操作过电压^[3,4]。黑启动过程中的合闸过电

压属于计划性的合闸操作,合闸操作之前,线路不存在接地故障和残余电压;合闸后,线路各点的电压由零值过渡到由电容效应决定的工频稳态电压。制定电力系统黑启动方案时,首先要确定自启动机组和被启动机组,然后确定从自启动机组到被启动机组之间的供电路径。选择供电路径时必须进行路径的空载充电过电压校验,过电压小于规定的限值才能作为可用的供电路径。

由于黑启动过程中作为自启动机组的发电厂通常是水力发电厂或抽水蓄能电厂,而作为被启动机组的发电厂通常是火力发电厂,地理位置上的距离使得充电路径较长、电压等级较高,从而过电压情况比较严重^[2,6~8]。这种情况下的过电压通常由两部分组成:工频过电压和操作过电压。由于工频过电压为稳态性质过电压,幅值一般较小,操作过电压占据了主导地位,因此在校验黑启动空充输电线路过电压时主要考虑操作过电压。在没有补偿装置的情况下,线路末端的过电压程度最高,所以通常情况下只要校验线路末端的过电压情况即可。其等值电路如图 1 所示,图中, U_1 为线路首端稳态电压幅值,为 U_2 线路末端稳态电压幅值, x 为与线路末端的距离, U_x 为 x 处的电压, E 为电源幅值, x_s 为电源漏抗, DL 为断路器。



图 1 空载合闸等值电路图

计算公式如下:这里只考虑计划性三相同期合闸,暂态过程只有正序分量。运算传播系数 $\gamma=\frac{p}{v}$,其中 $p=\frac{d}{dt}$, v 为正序波速,忽略电阻损耗,线路长为 l Z 为波阻,根据无损传输线方程,运算传播系数可写成:

$$\begin{aligned} A_x &= \operatorname{ch} \frac{px}{v}, & A_l &= \operatorname{ch} \frac{pl}{v}, \\ B_l &= Z \operatorname{sh} \frac{pl}{v}, & C_l &= \frac{1}{Z} \operatorname{sh} \frac{pl}{v} \end{aligned}$$

由于是空载线路,因此电压属于计划性的合闸操作,合闸操作之前,线路

$$u_x(p) = u(p) A_x = \frac{e(p) \operatorname{ch} \frac{px}{v}}{\operatorname{ch} \frac{pl}{v} + \frac{p l x_s}{Z} \operatorname{sh} \frac{pl}{v}} \quad (1)$$

式中, $u_x(p)$ 为离末端 x 处的电压, $u(p)$ 为线路末端运算电压, $e(p)$ 为电源电动势, $x_s=\omega L_s$ 为电源漏抗。

利用分解定理,求出 $u_x(p)$ 的原函数:

$$\begin{aligned} u_x(t) &= U_2 \cos \lambda_x \cos(\omega_i t + \theta) \\ &- \sum_{i=1}^{\infty} \frac{K_i S_i \cos \theta}{\cos \delta_i} \cos \frac{\omega_i x}{v} \cos(\omega_i t + \delta_i) \end{aligned} \quad (2)$$

其中, U_2 为末端稳态电压幅值,即:

$$U_2 = \frac{E}{\cos \lambda - \frac{x_s}{Z} \sin \lambda} \quad (3)$$

式中, λ 为导线长度的电角度; E 为电源幅值, x_s 为电源漏抗, $\lambda_x=\frac{\omega x}{v}$; ω_i 为自振角频率, θ 为电源相位角。 K_i , S_i 和 δ_i 为系数,由 ω_i , λ , x_s , Z 和 θ 表示。

由上式可见,式 (2) 右边第一项为过渡过程电压 $u_x(t)$ 的工频稳态分量(强制分量),后一项是暂态分量(自由振荡分量),合闸后线路各点的电压由零值过渡到有电容效应决定的工频稳态电压,从而出现振荡过电压。由于实际中长线路的分布参数特性和线路损耗的存在,操作过电压将由工频稳态分量和无限个迅速衰减的谐波分量叠加而成。因此,操作过电压是在工频过电压 U_2 的基础上振荡产生的, U_2 越高,操作过电压的幅值越高^[3,5]。

由于操作过电压的能量来源于系统本身,所以过电压幅值与系统的额定电压大致存在一定的倍数关系。通常以系统的最高运行相电压幅值 U_{phm} 为基值来计算过电压幅值的倍数 k 。操作过电压与系统结构、设备特性、特别是断路器的特性有关^[9]。在电力设备绝缘设计中,根据过电压保护规程对操作过电压倍数作如表 1 规定。

表 1 不同电压等级允许最大过电压倍数

电压等级	接地情况	允许最大过电压倍数
30~65 kV	非直接接地	4.0
110~145 kV	非直接接地	3.5
110~220 kV	直接接地	3.0
330 kV	直接接地	2.75
500 kV	直接接地	2 或 2.2

这些数据是参考国内外实测的统计并结合中国的运行经验确定的^[10]。

2 空载操作过电压的仿真计算

2.1 仿真软件

在 MATLAB 7.1 的仿真平台 SMULINK 下,应用

其中的电力系统模块库进行模型构建和仿真计算,它提供了由电力工业领域专家提出并经过实际验证的电力系统仿真分析专用的各种线性与非线性元件和模块,可以实现对电力系统的稳态和暂态仿真计算分析。

2.2 算例分析一

500 kV 线路为四分裂的输电线路如图 2 所示,其正序电抗、正序电容、零序电抗和零序电容分别为 $0.28 \Omega / \text{km}$, $0.14 \mu\text{F} / \text{km}$, $0.8 \Omega / \text{km}$, $0.009 \mu\text{F} / \text{km}$, 其正序电阻和零序电阻分别约为 $0.03 \Omega / \text{km}$ 和 $0.25 \Omega / \text{km}$ 。在上述仿真模型中,电压源采用的是正弦曲线,所以取三相同期合闸时间为 $t=0.01 \text{ s}$ 即 A 相电压达到最大值的情况;三相非同期合闸时间分别为 $t_1=0.01 \text{ s}$ $t_2=0.011 \text{ s}$ $t_3=0.012 \text{ s}$

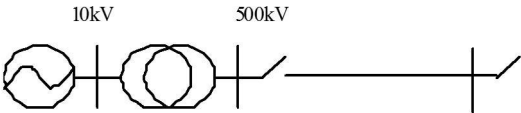


图 2 示例空载合闸等值电路图

在 MATLAB /SIMULINK 中根据示例的实际情况建立线路空载充电过电压仿真模型如图 3 所示,并按照相应的参数进行设置。

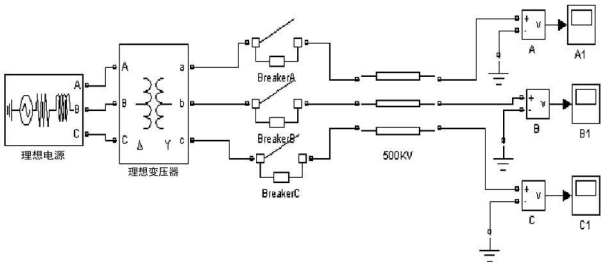


图 3 示例空载合闸仿真图

仿真结果如图 4 所示。

2.3 算例分析二

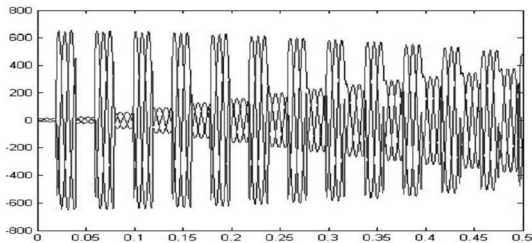
结合河北南网的实际情况,选取正在建设的张河湾抽水蓄能电厂作为黑启动电源,通过 220 kV 输电线路,经许营站、常山站给西柏坡电厂提供启动电源,其等值电路如图 5 所示。

表 2 线路末端空载合闸过电压倍数

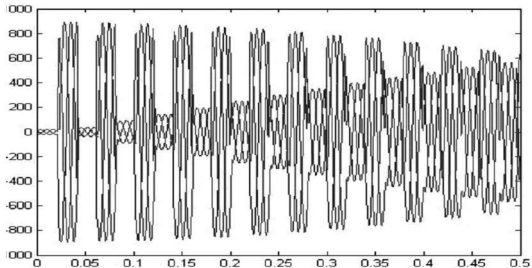
电压等级	同期合闸		非同期合闸	
	最大电压值	过电压倍数	最大电压值	过电压倍数
500 kV	640	1.568	898	2.199

在 MATLAB /SIMULINK 中根据河北南网实际情况建立线路空过电压仿真模型如图 6 所示。

仿真结果:在本例中,由于黑启动过程中的操作为计划性合闸操作,一般采取同期合闸操作,而不考虑不同期合闸操作。SIMULINK 仿真 A、B、C 相线路末端的过电压情况如图 7 所示。



(同期合闸操作过电压仿真图)



(非同期合闸操作过电压仿真图)

图 4 示例空载合闸线路末端电压仿真图

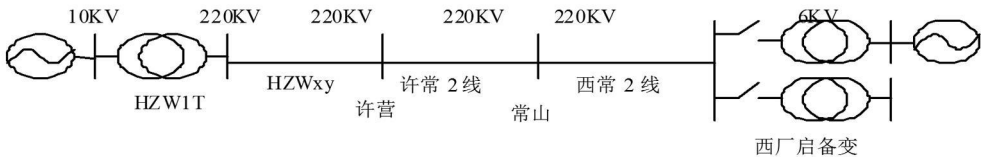


图 5 河北南网黑启动方案等值电路图

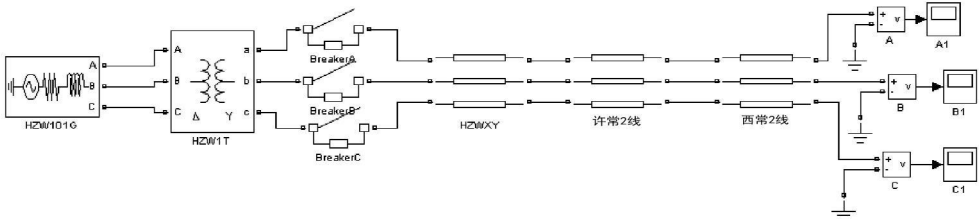


图 6 河北南网黑启动方案仿真图

(下转第 53 页)

[21] Belén García Juan Carlos Burgos Ángel Matías Alonso
Transformer Tank Vibration Modeling as a Method of De-
tecting Winding Deformations—Part I. Theoretical Foun-
dation. IEEE Trans on Power Delivery, Vol 21, No 1,
January 2006.

[22] 汲胜昌, 王世山, 李清泉, 李彦明, 孙强. 用振动信号分
析法监测变压器绕组状况 [J]. 高电压技术, 2002, 28
(4): 12—13.

作者简介:

诸兵, 男, (1973—), 硕士研究生. 现为四川电力公司自
贡电业局工程师, 主要从事电网运行与调度工作和电气设备
故障监测研究。

曾雪梅, 女, (1968—), 大专, 现为四川电力公司自贡电
业局技师、助理工程师, 从事电网的运行和调度工作。

黄晓艳, 女, (1979—) 年生, 本科, 现为华电内江发电总
厂助理工程师, 从事变电站运行工作。

(收稿日期: 2009—01—05)

(上接第 30 页)

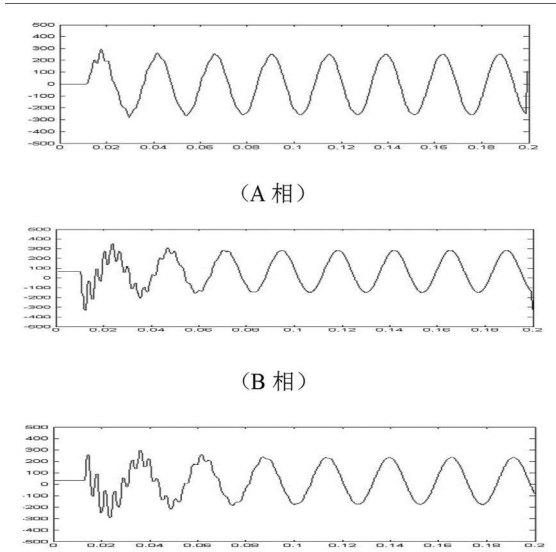


图 7 河北南网黑启动方案线路末端电压仿真图

线路合闸后末端 (西柏坡电厂 220 kV 母线) 单
相过电压波形如图 7 所示。其中 A 相电压最大值
240.3 kV, B 相电压最大值 -351.9 kV, C 相电压最
大值 -308.4 kV, 过电压以 B 相为最大, 过电压倍数
为 1.959。没有超过最大允许过电压倍数, 满足电力
线路运行要求, 此黑启动方案不存在过电压情况。

3 结论与措施

仿真计算结果分析表明, 电力系统在黑启动过程
中对空载输电线路进行合闸操作时存在过电压的可
能。在三相非同期合闸情况下, 线路末端过电压的情
况要高于三相同期合闸的情况, 结合河北南网的实际
情况, 在机组对 220 kV 线路进行空载充电合闸时, 线
路末端出现的过电压情况满足运行要求。但是随电
压等级的提高、线路的增长, 线路末端出现过电压的
概率会增大, 因此要采取有效的措施来抑制过电压情
况: 比如, 并联电抗器投入运行, 使电抗器的感性无功

功率可以对线路的容性无功进行部分补偿, 降低过电
压值; 双回线路投一回; 或者可以采用断路器的合闸
电阻来限制合闸过电压; 还可以通过控制断路器合闸
相角的方法, 即使合闸相角在电压过零点附近, 从而
降低合闸过电压。

参考文献

[1] 房鑫炎, 郁维镛, 熊慧敏, 等. 电力系统黑启动研究 [J].
中国电力, 2000, 33(1): 40—43.

[2] 郭嘉阳, 等. 华北电网“黑启动”实验研究 [J]. 华北电力
技术, 2001, (5): 3—17.

[3] 陈维贤. 电网过电压教程 [M]. 北京: 中国电力出版社,
1996.

[4] 李福寿编著. 电力系统过电压计算 [M]. 北京: 北京水
利电力出版社, 1986.

[5] 解广润, 电力系统过电压 [M]. 北京: 水利电力出版社,
1985.

[6] 顾雪平, 赵书强, 刘艳, 等. 一个实用的电力系统黑启动
决策支持系统 [J]. 电网技术, 2004, 28(9): 54—57.

[7] 张其明, 王万军. 陕西电网黑启动方案研究 [J]. 电网技
术, 2002, 26(4): 42—45.

[8] Gholoaris P. Prousalidis JM, Hatziaargyriou N D. et al. Sin-
ulation of long transmission lines energization for black start
studies [J]. IEEE Tran s on Power Systems 1994, 12
(3): 1093—1096.

[9] 张小易, 顾雪平, 电力系统黑启动过程中过电压问题的
研究 [D]. 华北电力大学硕士论文, 2003.

[10] 张纬钺, 高玉明, 电力系统过电压与绝缘配合 [M]. 北
京: 清华大学出版社, 1988, 112—117.

作者简介:

刘连志 (1982—), 男. 硕士研究生, 主要研究方向 电力
系统安全防御与恢复控制, 人工智能在电力系统中的应用;

赵灿 (1983—), 男, 助理工程师, 从事方向: 变电站运行
与维护管理;

韩振明 (1983—), 男, 助理工程师, 从事方向: 电能计量管理。

(收稿日期: 2009—01—05)

输电线路雷电干扰暂态识别的仿真研究

张丽娜, 陈 皓

(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘 要:随着超高压架空线路电压等级的提高,雷电现象下输电线路未造成短路故障的情况越来越多,这将使保护装置发生误动作。对于这种雷电干扰现象,文中利用 MATLAB 软件构建超高压输电线路仿真模型,对雷电故障及普通短路故障进行不同条件下的仿真并对数据及波形进行分析。发现他们近似分量能量的百分数值存在着很大的差别,由此构成识别雷电干扰的判据,大量的仿真数据表明所提方法是正确、有效的。

关键词:输电线路;识别;雷电干扰;暂态仿真模型;故障

Abstract: With the elevation of voltage class of EHV overhead line, the short-circuit fault increasingly does not occurs in transmission lines under the thunder, thus it would result in error action of protector. Aiming at the lightning interference, the EHV transmission line model using MATLAB is established. The simulation is performed in different conditions for lightning fault and short-circuit fault, and the data and waveform are analyzed. It is found that the percent value of approximation energy have a great difference. And then it becomes the criterion to identify the lightning interference. A large number of simulation data indicates that the method is correct and effective.

Key words: transmission line; identification; lightning interference; transient simulation model; fault

中图分类号: TM835 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)03-0031-05

输电线路分布很广,纵横交错,绵延数百公里,易受雷击,其线路的雷害事故在电力系统总的雷害事故中占很大的比例。加强输电线路防雷不仅可以减少雷击输电线路引起欧德雷击跳闸次数,还有利于变电站内电气设备的安全运行,是保证电力系统供电可靠性的重要环节。输电线路遭受的雷击有两种形式:感应雷和直击雷。感应雷是雷击线路附近地面或线路杆塔使导线上产生电磁感应;直击雷是雷直接击于输电线路,若产生的雷电流不够大时,将不会导致任何线发生绝缘闪络。因此,感应雷和直击雷都有可能使保护装置误动作。

MATLAB 是当今最优秀的科技应用软件之一,其中电力系统仿真工具箱功能更是强大,工具箱内部的元件库提供了经常使用的各种电力元件数学模型,并且提供了自己可以编程的方式创建合适的元件模型。这里采用 MATLAB 软件建立输电线路仿真模型,完成了四种不同短路情况及两种形式雷击情况的仿真,并采用小波变换对数据及波形进行处理^[1]。

1 雷电流波形及仿真模型

雷电放电所形成的电流具有单次脉冲性质,各个

雷电流的幅值和波形都不相同,大部分雷云对地放电时,其电流从几千安变化到数十千安,雷电流超过 100 kA 的很少。为了便于实验室试验和计算,将返回闪击的电流波形标准化。国际电工委员会(IEC)和中国国家标准规定了称之为 $1.2/50 \mu s$ 的标准雷电流波形,波前时间 $t_f = 1.2 \mu s$ 波尾时间 $t_d = 50 \mu s$ 。它是一随着时间上升很快、慢慢下降的单极性电流波^[2]。

雷电流的波形可表示为:

$$i = I_0 (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \quad (1)$$

式(1)为一个双指数函数,其中 I_0 为某一大于雷电流幅值 I 的电流值, $e^{-\beta t}$ 决定了函数图形衰减部分,决定其上沿。双指数波是与实际雷电流波形最为接近的等值计算波形,在数学分析中容易处理的,其结果精确度也是可以接受的。

这里利用 MATLAB 软件中 simulink 模块库建立仿真雷电流的模型,Fcn 是一个自定义功能可实现 MATLAB 函数的模块,对输入进行一个指定表达式的运算,文中即式(1),此模块容易使用且速度快。图 1 为雷电流的仿真模型;图 2 为应用模型仿真出的雷电流波形。

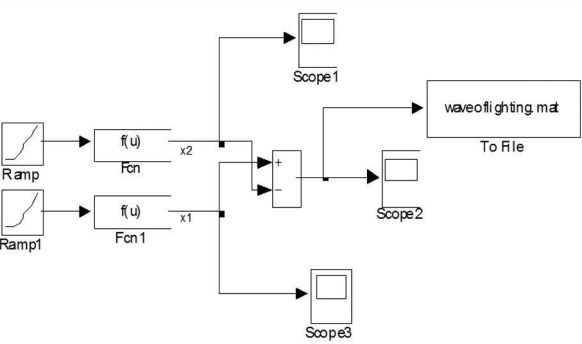


图 1 标准雷电流的仿真模型

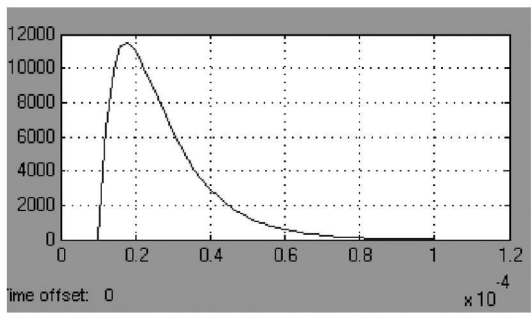


图 2 应用模型仿真的标准雷电流波

2 线路仿真模型的建立

研究的是电压等级为 500 kV 的超高压输电线路,其系统接线图见图 3 图中 S_1 、 S_2 分别为系统两端电压源电压, R 、 X 为线路的电阻和电抗。故障点设置如图 3 所示 d 点,考虑单相短路、两相短路、两相短路接地以及三相短路 4 种普通短路故障类型和直击雷与感应雷两种雷击故障。

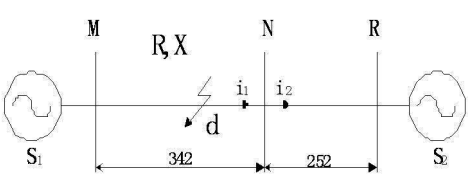


图 3 500 kV 超高压输电线路简化接线模型

利用 MATLAB 建立输电线路系统仿真模型如图 4 所示。其中三相电源 (3-phase source) 元件参数为:电源电压 $S_1=S_2=252$ kV, 电源内阻 $Z_{S1}=0.89+j25.9364$, $Z_{S2}=0.66+j16.5164$; 分布参数线路 (Distributed Parameters Line) 元件参数为:正序阻抗 $Z_1=0.0259+j0.2895\ \Omega/\text{km}$, 零序阻抗 $Z_0=0.1731+j1.03952\ \Omega/\text{km}$, 线路对地正序电容 $\alpha=0.0131\ \mu\text{F}/\text{km}$, 线路对地零序电容 $\alpha_0=0.071\ \mu\text{F}/\text{km}$, $LMN=342\ \text{km}$, $LNR=252\ \text{km}$; 三相故障器 (3-phase fault) 元件参数为:故障点电阻 $R_{on}=0.001\ \text{ohm}$ 接地电阻 $R_g=0.001\ \text{ohm}$ 。

3 暂态仿真研究

采用小波电流能量比值算法,此方法主要是故障启动后,将采集到的电流暂态信号相模变换,然后应用小波多分辨率分析提取小波变换系数,并计算能量比值。表 1 与表 2 中 E_a 表示暂态模电流小波尺度 5 的近似分量能量与暂态模电流总能量的百分比值; $E_{d1} \sim E_{d5}$ 表示暂态模电流尺度 1~5 的小波细节分量能量与暂态模电流能量的百分比值。图 5 至图 11 为输电线路故障和输电线路雷击条件下暂态模电流、

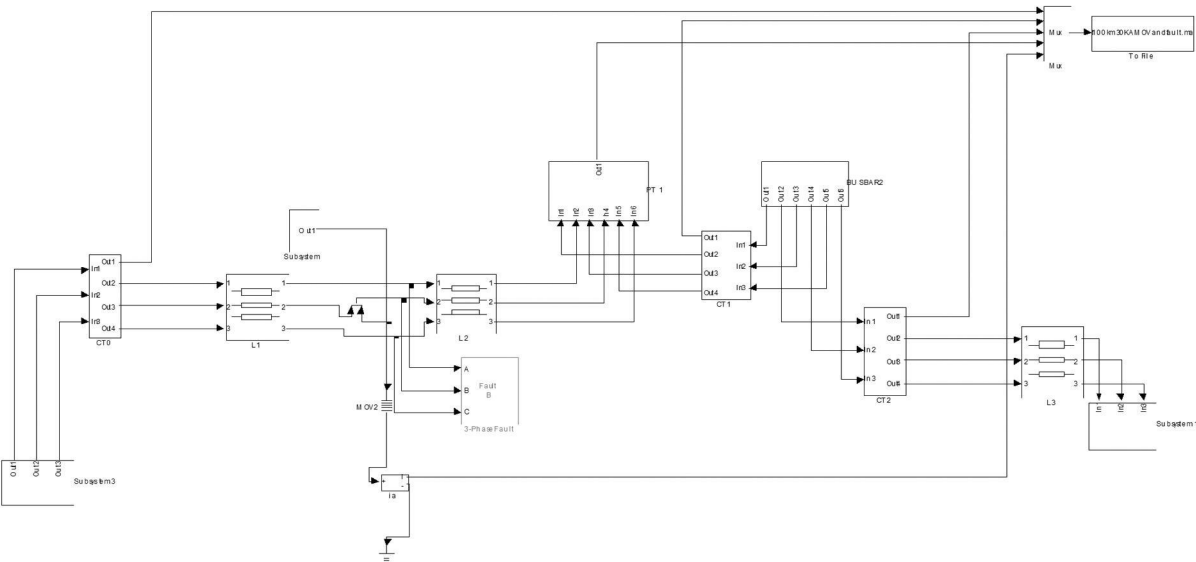


图 4 500 kV 超高压输电线路仿真模型

暂态模电流的小波近似分量和雷击实时识别判据计算的仿真波形。子图中 s_1 、 s_2 分别表示线路 L_{MN} 、线路 L_{NR} 母线 N 侧模量电流； a_{15} 、 a_{25} 分别表示线路 L_{MN} 、线路 L_{NR} 母线 N 侧模量电流的小波尺度 5 的近似分量；Ratio1、Ratio2 分别表示线路 L_{MN} 、线路 L_{NR} 雷击实时识别判据计算的仿真波形。

3.1 普通短路情况下的仿真研究

3.1.1 单相短路

仿真模型如图 4 所示,将三相故障器设置为单相短路故障 $f^{(1)}$,故障相为 A 相,故障时间为 20.1 ms 对应电压峰值发生故障;仿真条件故障点 d 距离 N 侧母线 200 km、150 km、50 km 不同距离发生短路故障。从表 1 单相短路情况可以看出暂态模电流小波尺度 5 的近似分量能量与暂态模电流总能量的百分比值 E_a 的值基本接近 100%,即趋近 1。若设门槛值为 $E_0 = 0.65$,则 $E_a > E_0$ 。从图 5 单相短路故障时的仿真波形也可看出 Ratio1、Ratio2 趋近于 1。

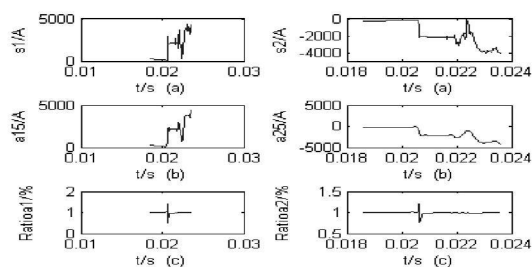


图 5 单相短路故障时的仿真波形

3.1.2 两相短路

将三相故障器设置为两相短路故障 $f^{(2)}$,故障相为 A、B 相,故障时间为 20.1 ms 对应电压峰值发生故障;仿真条件故障点 d 距离 N 侧母线 200 km、150 km、50 km 不同距离发生短路故障。从表 1 两相短路情况可以看出 E_a 的值基本接近 100%,即趋近 1。若设门槛值为 $E_0 = 0.65$,则 $E_a > E_0$ 。从图 6 两相短路故障时的仿真波形也可看出 Ratio1、Ratio2 趋近于 1。

3.1.3 两相短路接地

将三相故障器设置为两相短路接地故障 $f^{(1,1)}$,故障相为 AB 相且接地,故障时间为 20.1 ms 对应电压峰值发生故障;仿真条件故障点 d 距离 N 侧母线 200 km、150 km、50 km 不同距离发生短路故障。从表 1 两相短路接地情况可以看出 E_a 的值基本接近 100%,即趋近 1。若设门槛值为 $E_0 = 0.65$,则 $E_a > E_0$ 。从图 7 两相短路接地故障时的仿真波形也可看出 Ratio1、Ratio2 趋近于 1。

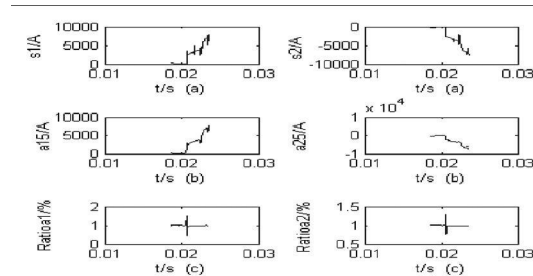


图 6 两相短路故障时的仿真波形

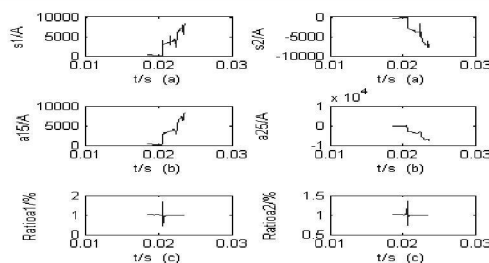


图 7 两相短路接地故障时的仿真波形

3.1.4 三相短路

将三相故障器设置为三相短路故障 $f^{(3)}$,故障相为 A、B、C 三相,故障时间为 20.1 ms 对应电压峰值发生故障;仿真条件故障点 d 距离 N 侧母线 200 km、150 km、50 km 不同距离发生短路故障。从表 1 三相短路情况可以看出 E_a 的值基本接近 100%,即趋近 1。若设门槛值为 $E_0 = 0.65$,则 $E_a > E_0$ 。从图 8 三相短路故障时的仿真波形也可看出 Ratio1、Ratio2 趋近于 1。

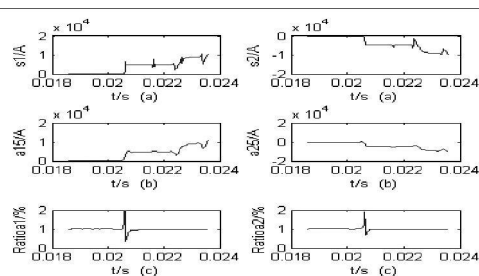


图 8 三相短路故障时的仿真波形

3.2 雷电情况下的暂态仿真

3.2.1 直击雷

图 9 仿真条件为线路 L_{MN} 距离 N 侧母线 150 km 发生线路雷击,雷电流幅值为 30 kA,线路雷击类型为直击雷,雷击相别为 B 相,属于故障性雷击;图 10 仿真条件为线路 L_{MN} 距离 N 侧母线 150 km 发生线路雷击,雷电流幅值为 15 kA,线路雷击类型为直击雷,雷击相别为 B 相,属于非故障性雷击视为雷电干扰;从表 2 可以看出故障性雷击时 E_a 的值基本接近 100%,即趋近 1。若设门槛值为 $E_0 = 0.65$,则 $E_a >$

E_0 。非故障性雷击时 E_a 的值基本接近 50%，即 $E_a < E_0$ 。从图 9、图 10 仿真波形也可以明显看出故障性雷击时 $Ratioa1$ 、 $Ratioa2$ 趋近于 1，非故障性雷击时 $Ratioa1$ 、 $Ratioa2$ 小于门槛值。

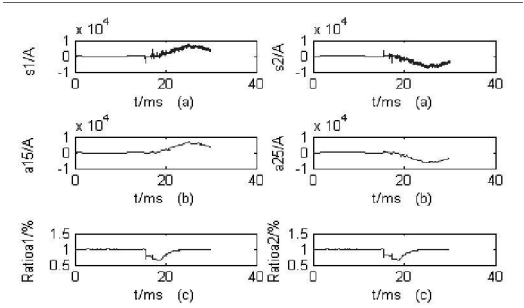


图 9 故障性雷击 (30 kA) 时的仿真波形

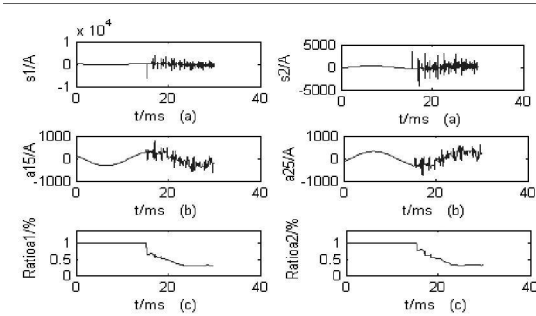


图 10 非故障性雷击 (15 kA) 时的仿真波形

3.2.2 感应雷

感应雷击于输电线路附近，在三相导线上感应的暂态波形基本一致，幅值基本相似，但存在一定的差异。因此，在仿真中做了这样的假设：三相暂态波形采用标准的雷电流波形，在幅值上各相差 10%，即 $i_1 \times 1.1 = i_2 = i_3 \times 1.1 = 5 \text{ kA}$ 。感应雷不会造成短路故障视为雷电干扰；从表 2 可以看出感应雷时 E_a 的值基本接近 60%，即 $E_a < E_0$ 。图 11 为线路 L_{MN} 距离

N 侧母线 150 km 附近发生线路雷击时的仿真波形，可以明显看出感应雷击时 $Ratioa1$ 、 $Ratioa2$ 小于门槛值。

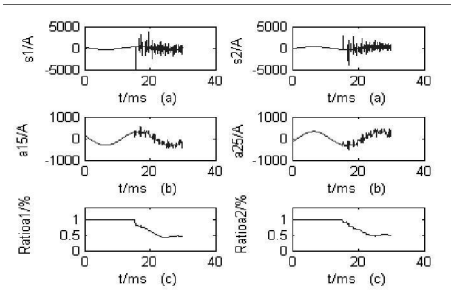


图 11 感应雷击 (5 kA) 时的仿真波形

4 仿真结果分析

依据小波电流能量比值算法对各种普通短路及雷击情况下进行仿真研究，并将直击雷造成线路短路即故障性雷击与普通短路故障均视为短路故障；感应雷与不引起绝缘闪络的直击雷造成的影响即非故障性雷击视为雷电干扰。从不同情况的仿真可以看出短路故障情况下 E_a 的值基本接近 100%，即趋近 1，若设门槛值为 $E_0 = 0.65$ ，则 $E_a > E_0$ ，仿真波形 $Ratioa1$ 、 $Ratioa2$ 趋近于 1；雷电干扰情况下 E_a 的值基本接近 60%，即 $E_a < E_0$ ，仿真波形 $Ratioa1$ 、 $Ratioa2$ 小于门槛值。此法有效地识别了输电线路上的雷电干扰，可使继电保护装置不发生误动作，减少对电力系统稳定的破坏。

5 结 论

表 1 各种短路情况不同条件下的仿真结果

类型	条件	E_a	E_{d1}	E_{d2}	E_{d3}	E_{d4}	E_{d5}
单相短路 $f^{(1)}$	200 km	99.481 0	0.223 2	0.166 9	0.088 7	0.034 0	0.006 3
	150 km	99.622 0	0.116 1	0.151 6	0.081 7	0.023 4	0.005 2
	50 km	99.687 0	0.112 2	0.109 0	0.065 8	0.022 8	0.003 2
两相短路 $f^{(2)}$	200 km	99.924 6	0.023 2	0.028 9	0.015 5	0.006 4	0.001 4
	150 km	99.931 1	0.027 0	0.022 2	0.013 9	0.005 0	0.000 8
	50 km	99.943 6	0.016 5	0.020 5	0.014 9	0.004 1	0.000 3
两相短路接地 $f^{(1,1)}$	200 km	99.907 5	0.030 3	0.036 1	0.017 1	0.007 4	0.001 6
	150 km	99.922 0	0.027 9	0.026 2	0.016 3	0.006 4	0.001 2
	50 km	99.931 2	0.017 6	0.022 6	0.020	0.007 6	0.001 0
两相短路 $f^{(3)}$	200 km	99.691 8	0.094 7	0.118	0.026 7	0.026 7	0.005 8
	150 km	99.716 4	0.110 7	0.090 8	0.057 5	0.021 1	0.003 5
	50 km	99.739 8	0.066 3	0.082 7	0.077 4	0.030 3	0.003 6

表 2 两种雷击情况不同条件下的仿真结果

类型	条件		E _a	E _{d1}	E _{d2}	E _{d3}	E _{d4}	E _{d5}
直击雷	故障性 30 kA	200 km	98.961 4	0.128 3	0.255 9	0.381 2	0.170 4	0.102 7
		150 km	99.188 6	0.092 4	0.186 3	0.355 1	0.114 4	0.063 3
		50 km	99.392 9	0.068 5	0.143 7	0.234 4	0.096 2	0.064 3
	非故障性 15 kA	200 km	45.403 3	9.432 3	14.019 2	16.778 4	9.96	4.406 7
		150 km	37.041 6	9.784 8	16.701 2	19.052 9	11.432 4	5.987 1
		50 km	47.392 2	7.470 5	14.093 9	16.341 3	9.43	5.272 1
感应雷	非故障性 5 kA	200 km	60.593 2	4.653 4	7.330 3	10.295 1	10.524 4	6.603 6
		150 km	57.637 2	4.395 1	7.619 2	11.966 3	10.966 3	7.800 2
		50 km	59.956 4	4.657 8	7.026 8	12.213 3	7.531 7	8.614 0

首先介绍了雷电流的波形,并利用 MATLAB 软件构建雷电流和输电线路仿真模型,通过参数的设定,对四种常见的普通短路和两种形式的雷击进行仿真实验。由仿真的数据和波形可以明显看出普通短路与雷电干扰及故障性雷击的区别,实现了输电线路雷电干扰暂态的识别方法,大量的仿真数据说明了该方法的可靠性和可行性。

参考文献

[1] 钟麟,王峰. MATLAB 仿真技术与应用教程 [M]. 国防工业出版社, 2004. 1.

[2] 施围,邱毓,等. 高电压工程基础 [M]. 机械工业出版社, 2006. 8.

[3] 董杏丽,葛耀中,董新洲,等. 行波保护中雷电干扰问题的对策 [J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(9): 74—78.

[4] 李海峰,王钢,赵建仓,等. 输电线路感应雷击暂态特性分析及识别方法 [J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(3):

114—119.

[5] 王钢,李海峰,赵建仓,等. 基于小波多尺度分析的输电线路直击雷暂态识别 [J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(4): 139—144.

[6] 段建东,张保会,等. 超高压线路暂态保护中雷电干扰与短路故障的识别 [J]. 电力系统自动化, 2004, 28(18): 30—35.

[7] 司大军,束洪春,陈学允,等. 输电线路雷击的电磁暂态特性分析及识别方法研究 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(7): 64—67.

[8] 段建东,任晋峰,张保会,等. 超高速保护中雷电干扰识别的暂态法研究 [J]. 中国电机工程学报, 2006, (23): 7—13.

作者简介:

张丽娜 (1984—),女,硕士研究生,研究方向是电力系统继电保护。

(收稿日期: 2008—12—12)

(上接第 4 页)

[14] Denis Lee Hau Aik Goran Andersson. Voltage stability analysis of multi-infeed HVDC system [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1997, 12(3): 1309—1316.

[15] 林良真,叶林. 电磁暂态分析软件包 PSCAD/EMTDC [J]. 电网技术, 2000, 24(1): 65—66.

[16] M. O. Fenuque Yuyan Zhang Venkata Dinavahi. Detailed modeling of CIGRE HVDC benchmark system using PSCAD/EMTDC and PSB/SMULINK [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(1): 378—387.

作者简介:

艾 飞 (1983—),男,硕士研究生,主要研究方向为高压直流输电、电力系统稳定与控制;

李兴源 (1945—),男,教授,博士生导师,中国电机工程学会理事, IEEE 高级会员,从事电力系统稳定与控制、高压直流输电、分布式发电等研究;

王晓丽 (1981—),女,硕士,主要研究方向为电力系统稳定与控制;

任永生 (1982—),男,主要研究方向为电力系统稳定与控制;

韦 立 (1983—),男,主要研究方向为电力系统稳定与控制;

刘 建 (1984—),男,硕士研究生,主要研究方向为高压直流输电、电力系统稳定与控制。

(收稿日期: 2009—02—19)

6~35 kV 配电网铁磁谐振对策初探

程德蓉¹, 刘启俊²

(1 成都电业局龙泉驿供电局, 四川 成都 610100; 2 四川电力试验研究院, 四川 成都 610072)

摘 要: 配电网发生铁磁谐振后, 将产生过电压, 危害极大。基于系统安全运行的需要, 于实践中总结了若干消谐措施, 并逐一进行了比较。

关键词: 配电网; 铁磁谐振; 过电压; 对策; 电压互感器; 安全运行

Abstract: When ferromagnetic resonance takes place in a distribution network, overvoltage will be produced that is of great harm. According to the requirements of safe operation, some measures of removing ferromagnetic resonance are summed up in the practice, and the measures are compared with each other.

Key words: distribution network; ferromagnetic resonance; overvoltage; countermeasures; voltage transformer; safe operation

中图分类号: TM864 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)03-0036-03

在 6~35 kV 的配电网中, 因变压器、消弧线圈、电压互感器等感性元件的磁饱和作用常常激发形成较高幅值的铁磁谐振过电压。铁磁谐振可以是工频谐振、也可以是高频谐振或分频谐振, 其具体表现为: ①产生高幅值的零序电压, 出现虚幻接地或接地指示错误; ②系统单相、二相或全相对地电压升高, 出现低频摆动, 引发绝缘闪络或避雷器爆炸; ③工频谐振产生反倾引起变压器负荷侧小电机反转, 变压器绕组电流急剧增加、铁心异音, 导线发生电晕; ④电压互感器保险熔断或爆裂, 使得仪表测量、接地保护等无法正常运行。

据统计, 35 kV 及其以下的配电网, 谐振故障率较高, 已受到业内人士广泛关注, 因此, 于实践中总结出一套便捷、高效的消谐措施, 尤为重要。

1 铁磁谐振形成原因

当系统发生铁磁谐振时, 参与谐振的电感呈非线性特性, 铁磁谐振可以分为外激发和自激谐振。实践证明, 产生铁磁谐振的两个必要条件是: ①系统工作在欠补偿状态, 即: 回路参数必须满足 $\omega L > 1/\omega C$; ②有激磁作用差, 容易饱和的铁磁材料存在或系统中存在一定程度的扰动, 如: 电网突然合闸、设备故障 (导线折断、熔断器仅一相或两相熔断、断路器操作不同期) 等等。有例为证: 位于四川的国内某巨型水电站, 在一个时期, 其 6 kV TV 先后有 6 台次损坏, 集中

表现为一次绕组匝间短路, 且外壳多处存在环氧树脂爆裂痕迹。究其原因, 无非有三: ①系统频繁投切大功率的感性负荷; ②该电站施工时, 在有限的空间内, 承包商施行立体作业, 因条件较差, 来自施工变电站的电缆常被外物破坏, 单相接地频繁, 造成 TV 铁心饱和; ③因雷击或其他原因, 线路瞬间弧光接地, 暂态过程中产生涌流。如图 1、图 2 所示, 在上述条件①、②、③中, 当满足 $\omega L = 1/\omega C$ 回路发生谐振, 具体表现为: 外加电动势 E 由零逐渐增大, 回路电流、电容及电感上的电压均突然大幅度上升, 引起 TV 一次绕组绝缘闪络, 形成过流, 最终造成 TV 爆裂。在实际操作中, 当谐振频率等于工频的整数倍时, 将会发生高频谐振, 产生高次谐波谐振过电压; 相应的, 当谐振频率等于工频的分数倍时, 将发生分频谐振, 产生分次谐波谐振过电压。经总结发现: 分频谐振相对于高频谐振、工频谐振, 因其感性元件的励磁电流高达额定值的几十倍, 危害较大。

影响互感器铁磁谐振过电压的因素如下。

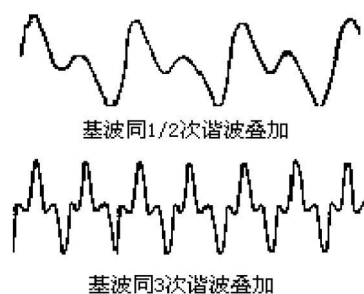


图 1 铁磁谐振波形图

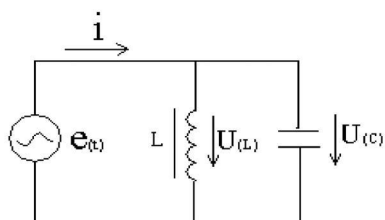


图 2 并联谐振电路图

(1)电压互感器伏安特性的影响。如图形 3 所示,铁心电感的伏安特性愈好,即铁心饱和得愈慢,谐振区愈向右移,也即谐振所需要的阻抗参数 X_{C0}/X_L 愈大;反之,愈向左移,即谐振所需 X_{C0}/X_L 愈小。

(2)电压互感器损耗的影响。运行中的互感器,一般损耗较大,例如,35 kV 的互感器其阻尼系数 r/X_L 为 $>15/10\ 000$,损耗电阻大,可以吸收一部分能量,对谐振有一定的抑制作用,特别是对 $1/2$ 频谐振,这种抑制作用很明显。

相关科研试验表明:当 X_{C0}/X_L 一定时,随着互感器高压线圈损耗电阻的增大,激发谐振所需的起振电压随之增加,它意味着谐振区域变窄。

(3)电压互感器结构的影响。单相电压互感器组的起振电压较三相五柱电压互感器的低,也就是说,单相电压互感器组容易激发谐振。这主要是由于两者线路结构的差异,造成零序阻抗不同所致。

2 解决方法

1)选用激磁作用较好的电磁式电压互感器或电容式电压互感器,从客观上增强 PV 自身的免疫能力;另外,还须从整体上净化 PV 一次回路及相关线路的工作环境,从而有效地防御因 PT 铁心饱和而造成铁磁谐振。

2)避免非全相操作断路器,空载母线需要送电时,应先投断路器,再投感性元件;因操作不当而诱发谐振时,应立即终止原操作,并将系统及时复归至初态;对已发生的谐振,可采用如下方法:①将变压器中性点临时接地;②投入备用的消弧线圈或规定的线路或其它特定设备等。

3)于 10 kV 及其以下等级的系统母线上,装设中性点接地且呈星形接法的等值并联电容器组或以电缆替代架空线路,以减小电网对地容抗,避免谐振。

4)在 TV 开口三角形侧接入电阻 $R \leq 0.4X_m$, X_m 为 TV 每相的励磁电抗归算至开口三角形处的阻

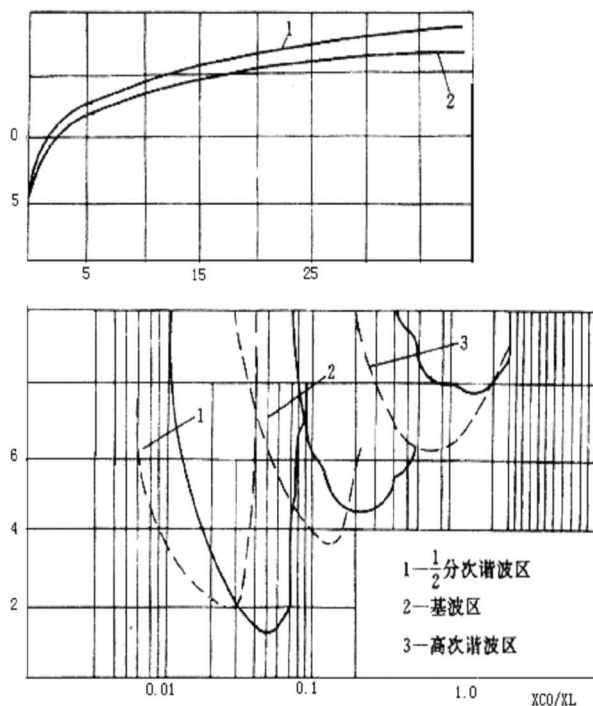


图 3 激磁电感的伏安曲线及谐振区域图

值。35 kV 以下的系统,一般取 $R \leq 100\ \Omega$,对于 10 kV 系统可接一级别为 500 W, $50 \sim 60\ \Omega$ 电阻;另外,也可利用钨丝在冷、热态阻值波动大的特点,在开口三角处接入一只 500 W 的灯泡,以增大回路的阻尼电阻,使 $\omega I \neq 1/\omega C$ 。缺点:当线路单相弧光接地时,灯泡易发热,此时,钨丝阻值必将上浮,致使消谐作用处于劣势。就纯理论而言,开口三角形接入的电阻越小越好,但就实际出发,如所接电阻过小,当遇到一次系统发生单相接地的情况时,则 TV 本体必然过热,互感器的安全受到影响。电阻法经济、方便,但阻尼力度不够强大,对一次涌流无限制作用。

5)在 TV 一次中性点处接入电阻 $R_0 = 0.06X_L$ 并满足热稳定要求, X_L 表示每相绕组在额定线电压下的激磁阻抗,其设计思想同步骤 4),也是为了增强回路自身的阻尼作用。6~35 kV 系统,常取 $5\ \Omega \leq R_0 \leq 30\ \Omega$,对于 10 kV 系统可接一级别为 150 W, $9\ k\Omega$ 的电阻。从理论上出发,TV 一次中性点处接入的电阻越大越好,但若过大,对被测设备进行接地监察时,其灵敏性势必受到影响,同时,由于 35 kV 以下系统属于中性点不接地系统,该系统若单相接地,中性点将发生偏移,非故障相电压将会提高 $\sqrt{3}$ 倍,TV 绝缘被威胁。

中性点串入的电阻等价于每相对地接入电阻,能够起到消耗能量、阻尼和抑制谐波的作用。在线路单

相接地时,由于中性点对地带有一定电位,故能相应减少非故障相 TV 绕组的电压,使 TV 的饱和程度降低,不至于发生铁磁谐振。但是电阻的接入使 TV 开口三角绕组输出电压相应降低,会影响接地指示装置的灵敏性。除了要考虑 $R \geq 6\% X_m$ 外,还要考虑电阻的热容量。当直接采用线性电阻时,往往由于电阻元件的容量及绝缘水平选择不当,使引线烧断,电阻烧毁,沿面闪络等。

下面定性地讨论 TV 中性点串电阻对各相绕组电压及开口三角绕组电压的影响。

假设 TV 在线电压时工作在饱和区,励磁电抗 $X / X_m = 1/6$, R 仍取 $6\% X_m$ 即 $60 \text{ k}\Omega$ 。C 相发生单相金属接地时,加消谐电阻时:

$$U'_{\Delta} / U_{\Delta} = 98.4\%$$

实际上由于 TV 的伏安特性一般较差,在加线电压时均会有一定程度的饱和。通过计算说明:在中性点串电阻时开口三角绕组输出电压仅为原来的 67.9% ,而串消谐电阻时则达到 98.4% ,比较之下串消谐电阻对接地指示装置的影响较小;同时 TV 中性点串电阻后,非故障相绕组的电压虽有降低,但幅度不大,其中一相绕组的电压更接近线电压,进入饱和区域,其消谐作用不大。

6)在 TV 的一次中性点处接零序电压互感器 TV_0 。当系统发生单相接地时,零序电压基本上均由 TV_0 承担,这样,当外部存在激发性因素时,可以最大限度地限制主 TV_0 在饱和区运行。另外,由于 TV_0 的直流电阻一般为 $10 \text{ k}\Omega$,这一大电阻对谐振同样起着很大的阻尼作用。分析如下:

当 TV 中性点串单相 TV_0 ,原 TV 的励磁电抗 $X_m = X_{L1} + X_{L0}$,优点有三:

(1) X_m 显著增大,比较易实现 $X_{C0} / X_m \leq 0.01$ 这个条件,使系统扰动时不致于发生谐振。

(2) TV_0 接入后: $U_0' = 4.33$, $U_{a0}' = 6.6$, $U_{b0}' = 6.6$,亦即加在非故障相 TV 绕组的电压下降至接近相电压,不会饱和,从而杜绝了谐振的发生。

(3)由 TV_0 二次绕组电压继电器作接地指示装置,在单相接地时其输出电压为 75 V ,可按此值进行整定计算,从而保证了接地指示装置的灵敏性。

若中性点串入 TV_0 的励磁电抗 X_{L0} 远大于 X_{L1} 值,则效果更佳。此时加在非接地相 L_1 和 L_2 、故障相 L_0 、中性点 TV_0 的 L_0 绕组的电压全部等于相电压 5.77 kV ,肯定不会饱和,而且接地指示装置可获得的输出

电压可达 100 V 。

7)在 TV 一次中性点接入消谐器。同 TV 一次中性点相匹配的消谐器接有 SC 非线性电阻,常态时呈高阻性,可使谐振在“萌芽”初期便遭受较大的阻尼作用,有力地遏制了其向“纵深”发展;如电网单相接地,则消谐器中的 SC 呈低阻性,同时,还能满足开口三角处电压不小于 85 V 的要求,使接地保护不受影响。另外,在消谐回路中,还接有一线性电阻(同 SC 串联),当电网发生弧光接地时,其固有阻值能有效地限制互感器的低频饱和电流。若采用 RXQ-10 型消谐器,其内部由 SC 非线性电阻片与线性电阻 ($6 \sim 7 \text{ k}\Omega$) 串接,在低压时呈高阻值,使谐振在初始阶段不易发展起来。在线路出现较长时间单相接地时,消谐器上将出现千余伏电压,电阻下降至稍大于 $6 \sim 7 \text{ k}\Omega$,使其不至于影响接地指示装置的灵敏性,同时非线性电阻片的热容量相当大,可满足放电电流的要求。据有关资料表明,同 TV 一次中性点相连的 RXQ 型消谐器,业绩较佳,当系统发生弧光接地时,对 TV 一次电流有明显的抑制作用,但也有不足之处:①当三相 TV 的伏安特性存在差异时,即使在正常工况下,TV 仍有可能发生中性点位移,导致电压表读数不准确;②当中性点不接地的变压器向空载母线送电时,有可能诱发谐振。

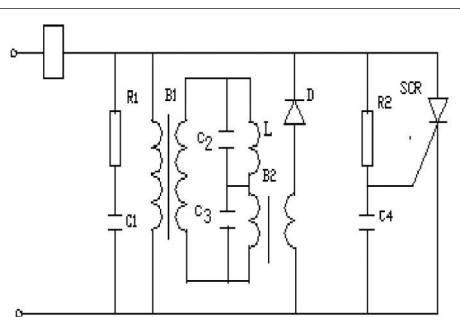


图 4 KFX 型分频消谐器示意图

8)在 TV 开口三角形接入消谐器。同 TV 开口三角形相匹配的消谐器,其消谐电阻也具有非线性特性,常态时工作在线性状态,如系统发生分频谐振,回路阻抗降低,当发生工频或高频谐振时,回路阻抗升高。这样,消谐电阻的非线性特性能够有效地抑制谐振过电压(高频、工频或分频),从而很好地保护了电气设备。

9)在 TV 开口三角形侧接入 KFX 型可控硅分频消谐器。见图 4,当电网发生分频谐振时,在消谐器内部 L 、 C_2 、 C_3 发生串联谐振,产生幅值较高的分频电

(下转第 76 页)

用有选择的转发代替二层广播,达到优化的目的。IP 组播在节省通信带宽、降低服务器和网络负载等方面较单播有许多优越性。

在目前变电站中,为了保证通讯的实时性和减小网络配置的工作量,往往采取单网段广播方式进行通讯,因此广播风暴也就无可避免了。广播风暴经常体现在保护、测控装置系统通信延时大,计算机程序反应慢,报文丢失或时标误差大等现象,甚至导致装置死机,影响变电站自动化系统通讯的实时性和可靠性,成为发生运行事故的隐患和故障分析时的信息盲区。因此根据变电站的实际规模和运行方式,适当地将通讯网络划分为多个网段,充分利用交换机的端口特性和 VLAN 特性,同时辅之以 QoS 及组播等配置,

可以较好挖掘交换机的通讯潜能,改善变电站通信网络的通讯效率。

3 结束语

智能交换机目前在电信行业已经进行了广泛的应用,在电力系统也有了逐步的使用,随着其价格的降低和性能的提升,在变电站自动化系统中大量应用智能交换机是具有现实可能性的。这对于电力工程人员在变电站调试和检修工作提出了新的要求,既懂电气又懂网络和通讯将是工程人员基本的素质和要求。

(收稿日期: 2008—12—10)

(上接第 38 页)

压,并经变压器耦合倒相后触发可控硅,此时,开口三角形被短接,产生强烈的阻尼作用使铁磁谐振迅速趋于衰减,其后,可控硅被恢复为阻断状态。可控硅分频消谐器工作原理类似于微电脑消谐器,为消谐工作提供了一种全新的思路。

10)对于线路不长的电网,在开口三角形绕组接 WNX 系列特定型号的微电脑多功能消谐装置,能消除高频、工频、分频谐振过电压。当系统发生单相接地时,给予判断,发接地信号,消谐装置不投,可以避免低值电阻长时间接在开口三角形侧导致互感器因过热而烧毁。缺点:当线路很长时,该装置对互感器瞬时低频饱和电流抑制较弱。

11)在 TV 的开口三角形处接吸能型消谐装置,此装置正由有关单位研制,其采用单片机控制,谐振时可以分析 TV 开口三角形的零序电压,且予以判定:①因系统单相接地而导致故障;② TV 因饱和引起谐振。并通过消能电容吸收能量最终达到消谐目的。见图 5,该装置能正确记录消谐次数,且能有效地区别谐振频率(高频、工频或分频)。

3 结 论

(1)对谐振力度不大的电网,可在 TV 一次中性点或开口三角形侧接入消谐电阻,此方法经济、便捷。

(2)对分频谐振频繁的电网,可采用 KFX 型可控硅分频消谐装置,其强有力的阻尼作用可使铁磁谐振迅速趋于衰减。

(3)对谐振频繁且线路不长的电网,可采用特定型号的 WNX 型微电脑消谐器,效果显著。

(4)对开口三角形已装设电阻(灯泡)后消谐效果不佳的电网,可在 TV 一次中性点处接入消谐器,还可以在开口三角形处改接零序 TV 或消谐器。

参考文献

- [1] 解广润. 电力系统过电压 [M]. 北京:水利电力出版社, 1985.
- [2] 杨恢宏,等. 单片机控制的吸能型消谐器研制 [J]. 四川电力技术, 2000, (3): 35—36.
- [3] 周泽存. 高电压技术 [M]. 北京:水利电力出版社, 1988.
- [4] 李达坚. 10 kV 电压互感器各种防谐振措施评述 [J]. 广东电力, 1999, 12(1): 34—37.

(收稿日期: 2008—12—07)

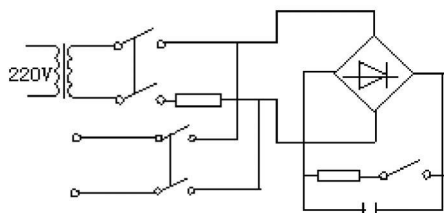


图 5 吸能型消谐器示意图

超高压输电线路绝缘子的可靠性评价

蓝健均¹, 李大勇²

(1 四川省电力公司, 四川 成都 610041; 2 四川省电力设计院, 四川 成都 610072)

摘 要:对输电线路绝缘子的可靠性评价准则和影响绝缘子可靠性的因素进行了分析,对输电线路绝缘子的安全施工和可靠运行具有参考价值。

关键词:输电线路;绝缘子;可靠性

Abstract: The reliability evaluation criteria of transmission line insulators and the factors influencing the reliability of insulators are analyzed. It gives a reference to the safe construction and reliable operation of transmission line insulators.

Key words: transmission line; insulator; reliability

中图分类号: TM261 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)03-0039-02

绝缘子性能的优劣直接影响到输电线路,特别是超高压(EHV)输电线路运行的可靠性和经济性。因此,如何评价 EHV 输电绝缘子的可靠性,已成为电力部门和绝缘子制造部门尤为关注的问题。

在架空输电线路现在使用的有三种材料绝缘子——瓷绝缘子、玻璃绝缘子和有机复合绝缘子。中国目前的生产现状是以生产和使用瓷绝缘子为主,玻璃绝缘子国内生产能力只占国内绝缘子总需求量的 20%;虽然复合绝缘子的研制起步较晚,由于近年来国内外在此技术上的进展较快,生产和使用量已呈上升态势。

1 对绝缘子可靠性评价的五项准则

运行的可靠性是决定绝缘子生命力的关键。最好的评价应是大量绝缘子在输电线路长期运行的统计结果和可靠性试验所反映出来的性能水平。因此,评价绝缘子应遵循下述准则。

1.1 寿命周期

产品在标准规定的使用条件下,能够保持其性能不低于出厂标准的最低使用年限为“寿命周期”。此项指标不仅反映绝缘子的安全使用期,也能反映输电线路投资的经济性。中国曾先后多次对运行 5~30 年的玻璃和瓷绝缘子进行机电性能跟踪对比试验。结果表明,玻璃绝缘子的使用寿命取决于金属附件,瓷绝缘子的使用寿命取决于绝缘件。玻璃绝缘子的寿命周期可达 40 年,而瓷绝缘子除全面采用国外先进制造技术后有可能较大幅度地延长其寿命周期外,

其平均寿命周期仅为 15~25 年;复合绝缘子经历了“三代”的发展,但从迄今世界范围内的试验及运行结果分析来看,其平均寿命周期只有 7 年。

1.2 失效率

运行中年失效绝缘子件数与运行绝缘子总件数之比称为年失效率。对于国产玻璃绝缘子,其寿命周期内平均失效率为 $(1\sim4) \times 10^{-4} / \text{a}$ 。对于国产瓷绝缘子的失效率,除个别合资企业产品将有可能降低外,比玻璃绝缘子约高 1~2 个数量级;对于复合绝缘子,由于寿命周期不能预测、复合材料配方和制造工艺还不能完全定型,其失效率很难预测。

1.3 失效检出率

绝缘子失效后能否检测出来的检出率对线路安全运行的影响是比失效率本身更为重要的因素。检出率取决于绝缘子失效的表现形式和失效的原因。玻璃绝缘子失效的表现形式是“自动破碎”和“零值自破”。“自破”不是老化,而是玻璃绝缘子失效的唯一表现形式,所以只需凭借目测就可方便地检测出失效的绝缘子,其失效检出率可达百分之百;瓷绝缘子失效的表现形式为头部隐蔽“零值”或“低值”,复合绝缘子失效的主要表现形式为伞裙蚀损以及隐蔽的复合“界面击穿”。此外,瓷和复合绝缘子失效的原因是材料的老化,而老化程度是时间的函数。老化是隐蔽的,因此给检测带来极大的困难,造成检出率极低;对于复合绝缘子,实际上根本无法检测。

1.4 事故率

年掉线次数与运行绝缘子件数之比称为年事故率。绝缘子掉串是架空输电线路最为严重的事故之

一。对于 EHV 输电,若造成大面积、长时间停电,后果则不堪设想。

国产玻璃绝缘子 30 年来的运行经验证明:在 220~500 kV 的输电线路,从来没有因为玻璃绝缘子失效而发生过掉线事故,而国产瓷绝缘子掉线事故率则高达 2×10^{-5} 。前苏联的研究指出,即使失效率相同,瓷绝缘子较玻璃绝缘子事故率也至少高一个数量级。由于复合绝缘子为长棒式,掉线事故一般很少发生,但导致内绝缘击穿、芯棒断裂和强度下降的因素始终存在,一旦失效,事故概率会高于由多个元件组成的绝缘子串。

1.5 可靠性试验

为对绝缘子进行可靠性评价,国内外曾对玻璃绝缘子和瓷绝缘子作过各种方式的加速寿命试验和强制老化试验。如:陡波试验、热机试验、耐电弧强度试验、1 500 万次低频 (18.5 Hz) 和 200 万次高频 (185~200 Hz) 振动疲劳试验及内水压试验,都从不同角度得出结论:与玻璃绝缘子相反,绝大多数瓷绝缘子都不能通过这些试验。对于复合绝缘子,可靠性试验则还是一个有待于继续探索的课题。

2 影响绝缘子可靠性的三大因素

2.1 材料是基础

玻璃和瓷均属铝硅酸盐,瓷是三相(结晶相、玻璃相和气相)共存的不均质体,而玻璃是液态和玻璃态互为可逆的均质体。"均质性"是影响绝缘材料介电强度的重要因素。脆性材料的机械强度和热稳定性,不完全取决于材料力学性质,而极大程度上取决于材料内部的缺陷和表面状态。这就是钢化玻璃较之退火玻璃和瓷、上釉的瓷较不上釉的瓷强度高得多的原因。此外,玻璃的"热钢化"技术,赋予玻璃表层一个高达 100~250 MPa 的永久预应力。这就是"钢化玻璃"强度钢铁化,热稳定性高,较瓷不易老化和寿命长的道理。对于复合绝缘子的难点是解决有机材料在户外条件下的老化、芯棒的脆断和蠕变。可见,钢化玻璃既较瓷有高得多的机械、绝缘强度,又较有机材料具有优良的抗老化性能,为绝缘子的可靠运行奠定了良好的基础。

2.2 产品结构和耐污性能是关键

玻璃绝缘子采用圆柱头结构,承力组件受力均匀。较之国内传统瓷绝缘子数十年一贯制的圆锥头结构,具有尺寸小、重量轻、强度高和电性能优良的特

点。由于玻璃的线膨胀系数较瓷大得多,外型尺寸较复合绝缘材料小得多,且与金属附件和水泥易连接,因而受力组件材质匹配良好。在各种气候条件下,不会象瓷绝缘子和复合绝缘子那样容易产生危险应力而导致老化。且复合绝缘子很难解决复合界面的结构质量。

但复合绝缘子具有优良的耐污性能,而且通常无需清扫。这就极大地减少了线路维护费用。就此而论,复合绝缘子发展前景广阔。玻璃的介电常数较大,因而单只玻璃绝缘子的干闪络电压比瓷绝缘子的低,但有较大的主电容来改善表面的电压分布,使之与瓷绝缘子串的闪络电压相当。加之玻璃绝缘子泄漏比距大,表面产生的凝聚物少,抵抗由污秽引起的热应力的能力强,因而不易因闪络而出现事故。华东电网十年来的污闪实践一再证明,玻璃绝缘子的耐污性能优于瓷绝缘子。

2.3 制造水平是保证

在国外,优质产品的生产均已形成相当经济规模、且具有工艺先进的高自动化生产线。因而,整个西欧和前苏联,玻璃绝缘子的市场占有率高达 90% 以上;整个北美复合绝缘子使用量为世界之最,占本地绝缘子市场总量的 25%~30%;在日本,瓷绝缘子则一统天下。在中国,所幸的是国产玻璃绝缘子通过技术引进和自己开发,已具备了上述生产条件。对于瓷和复合绝缘子,除个别合资企业外,上述制造水平在中国尚未达到。可见,选用何种产品还取决于产品的制造水平和对产品性能及使用环境的全面了解。

3 结 语

(1) 绝缘子的寿命周期、失效率、失效检出率、事故率和可靠性试验,应成为综合评价 EHV 绝缘子可靠性的五项准则。

(2) 扩大使用国产玻璃绝缘子在当前有着较大优势。作为玻璃绝缘子制造者应精益求精,有效降低绝缘子运行头几年的失效率。

(3) 复合绝缘子有着较为广阔的发展前景,应集中力量开发研制,以求在延缓材料老化和预测寿命周期上取得突破。

(4) 具有悠久生产历史的国产瓷绝缘子,应加大技术改造力度,在材料配方、产品结构和制造水平上取得更大的进展。

(收稿日期: 2008—12—26)

一种无锁相环的单相电路谐波和无功电流检测方法

周 波

(乐山电业局, 四川 乐山 614000)

摘 要:在电气化铁路中, 电力机车是一个运行的、急剧变化的单相牵引负荷, 当由其引起的电网电压波动较严重时, 可能导致检测方法中使用的锁相环处于失锁状态而无法进行准确检测。在有功电流分离法的基础上, 提出了一种无锁相环的单相电路谐波和无功电流检测方法。理论分析和仿真证明, 该方法可以实时检测出单相电路谐波和无功电流, 原理简单、易于实现。

关键词:锁相环; 单相电路; 谐波; 无功电流; 实时检测

Abstract In the electrification of the railway the electric locomotive is a running and sharp change in the single-phase traction load. When the voltage fluctuations caused by it are in a more serious situation, it could lead to the phase-locked loop used in the detection method in a state of losing lock that cannot be accurately detected. Based on the active current separation method, a detection method without phase-locked loop is put forward for single-phase circuit harmonic and reactive current. Theoretical analysis and simulation show that the method can detect real-time single-phase circuit harmonic and reactive current which is simple in principle and easy to achieve.

Key words phase-locked loop; single-phase circuit; harmonic; reactive current; real-time detection

中图分类号: TM835 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)03-0041-03

在电气化铁道中, 电力机车是一个单相整流型牵引负荷, 三相不对称, 运行时对电网注入了大量的谐波电流, 从而引起电网电压、电流波形畸变, 供电质量恶化, 严重时甚至影响到电力系统的安全运行。

谐波与无功电流检测的方法有很多, 其基本原理是将单相电网电流进行分解, 用与电网电压同频同相的单位正余弦信号分别与电网电流相乘, 经过低通滤波器后得到电网电流中的瞬时基波有功电流和瞬时无功电流, 进而得到瞬时谐波电流。该方法算法简单, 硬件实现容易。

有功电流分离法中, 与电网电压同频同相的单位正余弦信号是用锁相环得到的。使用锁相环虽然可以得到电网电压的基频和初相角, 但也容易受到信号的影响^[2]。当电网电压波动较严重时, 较大的频率偏移会导致锁相环处于无锁状态而无法准确地进行相位跟踪, 从而难以得到与电网电压同频同相的单位正余弦信号, 也就无法准确地检测谐波和无功电流。

在有功电流分离法的基础上, 提出了一种无锁相环的单相电路谐波和无功电流检测方法, 通过预先设定正余弦信号的频率和初相角, 从而不要锁相环就能准确检测出负载电流的谐波和无功分量。该方法实现了有功电流分离法的优点, 不受电压畸变的影响,

节省了锁相环电路, 算法简单, 容易实现。

1 无锁相环的单相电路谐波和无功电流检测的基本原理

不失一般性, 假设电网电压无畸变, 令 $u_s(t) = U_s \cos \omega t$ 周期性非正弦电网电流用傅立叶级数展开为:

$$\begin{aligned} i(t) &= I_m \cos(\omega t + \varphi_1) + \sum_{n=3}^{\infty} I_m \cos(n\omega t + \varphi_n) \\ &= I_m \cos \varphi_1 \cos \omega t - I_m \sin \varphi_1 \sin \omega t + \sum_{n=3}^{\infty} I_m \cos(n\omega t + \varphi_n) = i_p(t) + i_q(t) + i_h(t) \\ &= i(t) + i_h(t) \end{aligned} \tag{1}$$

式中, $i(t)$ 为瞬时基波电流; $i_p(t)$ 为瞬时基波有功电流; $i_q(t)$ 为瞬时基波无功电流; $i_h(t)$ 为瞬时谐波电流; φ_1 为基波电流 $i(t)$ 的初相角; φ_n 为各次谐波电流的相位角。

一般电网电流中都含有 3 次以上的谐波, 故上式中的 n 以 3 为下限。

式 (1) 中电网电流 i 可以测出, $\cos \omega t$ 是与电网电压同相位的正弦量。如果能够计算出 I_m 和 φ_1 , 就可算出基波有功和无功电流, 从而得到谐波电流。

由于电网电压电流基频都是 50 Hz 经过有源滤

波器补偿后也希望得到频率为 50 Hz 基频电流, 并且检测出的基频电流实际上也是 50 Hz 因此, 可以直接确定正余弦信号的角频率 $\omega = 2\pi f$ $f = 50$ Hz 相位角任意, 设为 θ 则正余弦信号分别为 $\sin(\omega t + \theta)$ 、 $\cos(\omega t + \theta)$ 。将上式两边同乘以 $\cos(\omega t + \theta)$, 则有:

$$\begin{aligned} i(t) \cos(\omega t + \theta) &= I_m \cos(\omega t + \varphi_1) \cos(\omega t + \theta) + \\ &\sum_{n=3}^{\infty} I_m \cos(n\omega t + \varphi_n) \cos(\omega t + \theta) = \frac{I_m}{2} [\cos(\theta \\ &- \varphi_1) + \cos(2\omega t + \varphi_1 + \theta)] + \sum_{n=3}^{\infty} \frac{I_m}{2} \{ \cos \\ &[(n+1)\omega t + \varphi_n + \theta] \cos[(n-1)\omega t + \varphi_n - \theta] \} \end{aligned}$$

$$\text{其中, 直流分量为: } I_p = \frac{I_m}{2} \cos(\theta - \varphi_1) \quad (3)$$

采用截止频率代于 2 倍电流基波频率的低通滤波器对 $i(t) \cos(\omega t + \theta)$ 进行滤波, 可得 I_p 。

同理, 将式 (1) 两边同乘以 $\sin(\omega t + \theta)$, 则有:

$$\begin{aligned} i(t) \sin(\omega t + \theta) &= I_m \cos(\omega t + \varphi_1) \sin(\omega t + \theta) + \\ &\sum_{n=3}^{\infty} I_m \cos(n\omega t + \varphi_n) \sin(\omega t + \theta) = \frac{I_m}{2} [\sin(\theta \\ &- \varphi_1) + \sin(2\omega t + \varphi_1 + \theta)] + \sum_{n=3}^{\infty} \frac{I_m}{2} \{ \sin[(n \\ &+ 1)\omega t + \varphi_n + \theta] \sin[(n-1)\omega t + \varphi_n - \theta] \} \end{aligned} \quad (4)$$

其中, 直流分量为:

$$I_q = \frac{I_m}{2} \sin(\theta - \varphi_1) \quad (5)$$

采用同样的低通滤波器对 $i(t) \sin(\omega t + \theta)$ 滤波, 可得 I_q 。

由式 (3) 与式 (5) 可推得:

$$I_m = 2 \sqrt{I_p^2 + I_q^2} \quad (6)$$

$$\varphi_1 = \theta - \arctg \frac{I_q}{I_p} \quad (7)$$

特殊地, 若假设 $\theta = 0^\circ$, 则:

$$\varphi_1 = \theta - \arctg \frac{I_q}{I_p} \quad (8)$$

综上, 只要任意给定一个相位角 θ 以正余弦信号 $\sin(\omega t + \theta)$ 、 $\cos(\omega t + \theta)$ 为参考, 由式 (7)、(8) 就可计算出 I_m 、 φ_1 , 从而可得基波有功电流、基波无功电流及谐波电流:

$$i_p(t) = I_m \cos \varphi_1 \cos \omega t \quad (9)$$

$$i_q(t) = -I_m \sin \varphi_1 \sin \omega t \quad (10)$$

$$i_h(t) = i(t) - i_p(t) - i_q(t) \quad (11)$$

由式 (3) ~ (11) 构造无锁相环的单相电路谐波和无功电流检测原理图如图 1 所示。

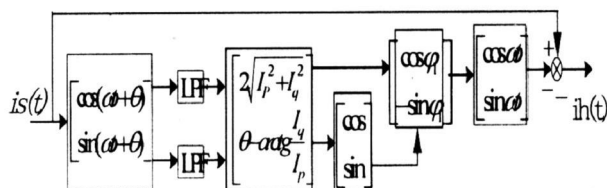


图 1 检测原理图

由图 1, 该检测方法节省了锁相环电路, 幅值和初相角的计算可以通过 DSP 实现, 因此使用乘法器、低通滤波器、加法器即可实现, 从而简化了硬件电路。

当电网电压发生畸变时, 综上, 仍以正余弦信号 $\sin(\omega t + \theta)$ 、 $\cos(\omega t + \theta)$ 为参考, 可求电网基波电压的初相角 φ_1 及基波电流的幅值 I_m 和初相角 φ_1 。特殊地, 若设 $\theta = 0^\circ$, 则:

$$\varphi_1 = -\arctg \frac{U_q}{U_p} \quad (12)$$

$$U_m = 2 \sqrt{U_p^2 + U_q^2} \quad (13)$$

$$u_p(t) = U_m \cos \varphi_1 \cos \omega t \quad (14)$$

$$u_q(t) = -U_m \sin \varphi_1 \sin \omega t \quad (15)$$

$$u_h(t) = U_m \cos(\theta + \varphi_1) + \sum_{n=3}^{\infty} U_m \cos(n\omega t + \varphi_n) \quad (16)$$

$$I_m = 2 \sqrt{I_p^2 + I_q^2} \quad (17)$$

$$\varphi_1 = \arctg \frac{I_q}{I_p} \quad (18)$$

由此可得电网基波有功电流、基波无功电流及谐波电流:

$$i_p(t) = I_m \cos(\varphi_1 - \varphi_1) \cos(\omega t + \varphi_1) \quad (19)$$

$$i_q(t) = -I_m \sin(\varphi_1 - \varphi_1) \sin(\omega t + \varphi_1) \quad (20)$$

$$i_h(t) = i(t) - i_p(t) - i_q(t) \quad (21)$$

2 仿真分析

2.1 电网电压无畸变的情况

基于 Matlab/Simulink 针对上述检测方法进行了仿真。仿真中设电网电压无畸变, 负载为单相感性整流负载。电网电压 u_s 、电流波形 i 如图 2(a) 所示, i 为滞后电压 $\pi/6$ 的方波电流。仿真结果见图 2(b)、(c)、(d)、(e)。

2.2 电网电压有畸变的情况

仿真中设电网电压发生了畸变,负载仍为单相感

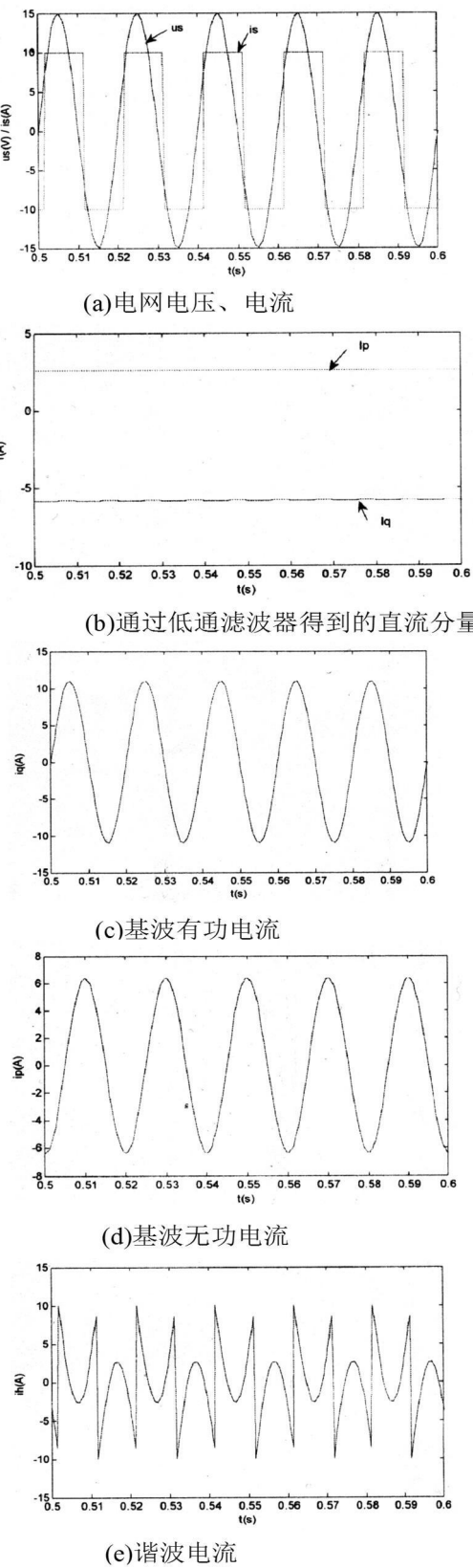


图 2 电网电压无畸变时的仿真结果

性整流负载。电网电压 u_s 、电流波形 i_i 如图 3(a)所示。电网电压 u_s 含有 3、5、7、9、11 次谐波, i_i 仍为滞

后基波电压 $\pi/6$ 的方波电流。采用该检测方法的仿真结果如图 3(b)、(c)所示。

图 3(b)是基波电流的检测结果。图中两条曲线分别是基波电流理论值和检测值曲线。由图可见,大约 0.1 s 后两曲线重合,由此说明该方法能够实时、准确地检测电网基波电流。图 4(c)是对谐波电流的检测结果。

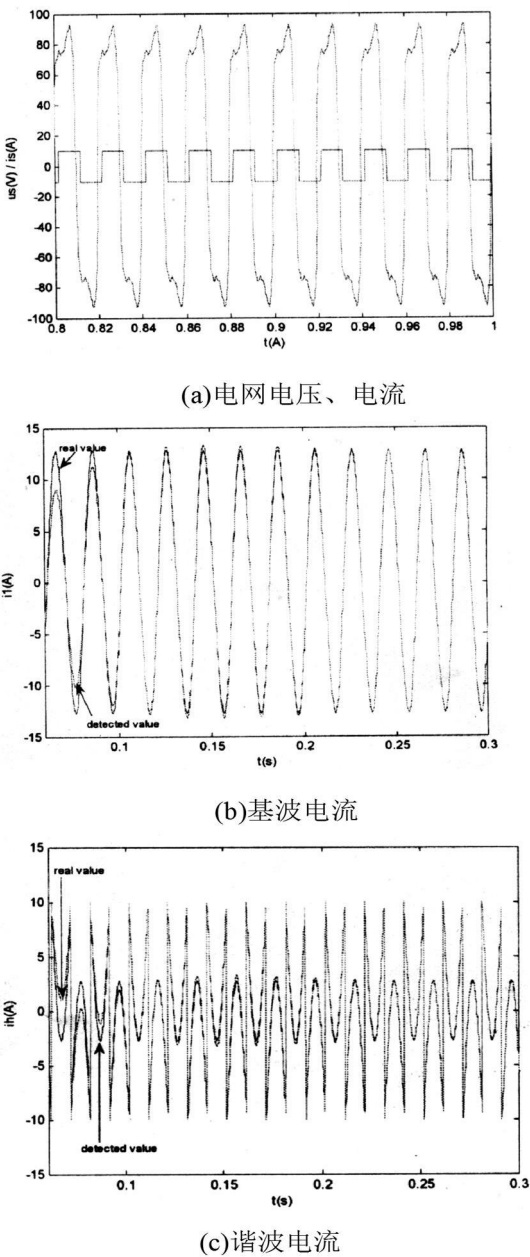


图 3 电网电压畸变无锁相环时的仿真结果

3 结 论

通过理论分析和仿真证明,所提出的无锁相环的
(下转第 60 页)

一个十分重要的课题。提出了一种自适应遗传—禁忌搜索 (IAGA—TS)混合算法,算法改进了文献 [5] 提出的 IAGA 算法,缩小了解搜索空间,加快算法寻优速度及鲁棒性,形成了一种快速、准确的 OPP 问题解决方法,算例仿真结果证明了该方法的有效性。

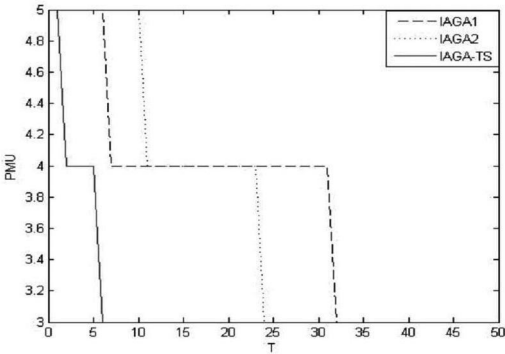


图 3 IEEE 14 节点系统仿真结果对比

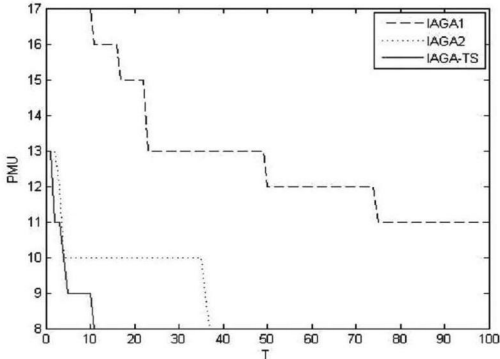


图 4 IEEE 39 节点系统仿真结果对比

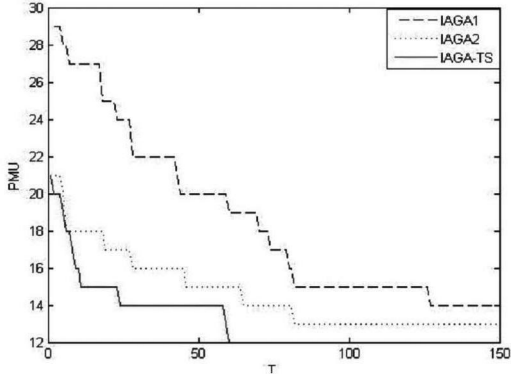


图 5 IEEE 57 节点系统仿真结果对比

参考文献

[1] 许树楷,谢小荣,辛耀中.基于同步相量测量技术的广域测量系统应用现状及发展前景 [J]. 电网技术, 2005, 29 (2): 44—49.

[2] Marin F J Garcia—Lagos F, Joya G, et al Genetic algorithms for optimal placement of phasor measurement units in electrical networks[J]. IEEE electronics Letters 2003, 39(19): 1403—1405.

[3] Nuqiu R F, Phadke A G. Phasor measurement unit placement techniques for complete and incomplete observability [J]. IEEE Trans on Power Delivery 2005, 20 (4): 2381—2388.

[4] Baklwin T L, Mili L, Boisen M B, et al Power system observability with minimal phasor measurement placement [J]. IEEE Trans on Power Systems 1993, 8 (2): 707—715.

[5] 沙明智,郝育黔,郝玉山,等.电力系统 PMU 安装地点选择优化算法的研究 [J]. 继电器, 2005, 33(7): 31—37.

[6] 李强,于尔铿,吕世超,等.一种改进的相量测量装置最优配置方法 [J]. 电网技术, 2005, 29(12): 57—61.

[7] Srinivas M, Patnaik IM. Adaptive Probabilities of Crossover and Mutation in Genetic Algorithms [J]. IEEE Trans on Systems Man and Cybematics 1994, 24 (4): 656—667.

[8] 王小平,曹立明.遗传算法——理论、应用与软件实现 [M]. 西安交通大学出版社, 2000.

[9] A. H. Mantawy, Youssef L, Abdel—Magid, Shokri Z, Selin. Integrating Genetic Algorithms Tabu Search and Simulated Annealing for the unit commitment problem // IEEE Trans on Power Systems 1999, 14 (3): 829—836.

[10] 王凌.智能优化算法及其应用 [M]. 清华大学出版社, 2001.

作者简介:

李新振 (1982—),男,硕士研究生,研究方向为电力系统调度及其自动化。

滕 欢 (1965—),女,高级工程师,长期从事电力系统调度自动化科研、教学及工程实践工作。

(收稿日期: 2008—12—15)

(上接第 43 页)

单相电路谐波检测方法,通过预设正余弦信号的基频和初相角,不要锁相环就能准确地检测出谐波和无功电流。该方法算法简单,硬件电路容易实现。

参考文献

[1] 王兆安,杨君,刘进军.谐波抑制和无功补偿 [M]. 北

京:机械工业出版社, 1998, 209—238.

[2] 张厥盛,郑继禹,万心平.锁相技术 [M]. 西安电子科技大学出版社, 1994, 1—18.

(收稿日期: 2008—12—26)

线路带负荷测试标准化作业卡的编制与运用

何士卿

(广元电业局, 四川 广元 628000)

摘 要:以“110 kV 线路保护带负荷测试工作”为例, 针对工作中如何完善“现场标准化作业卡”的编制与现场实际运用, 提出几点看法。

关键词:继电保护; 标准化作业卡; 带负荷测试

Abstract Taking "on-load testing of 110kV line protection" for example, some opinions are put forward for improving the preparation of "on-site standardized operation card" and its practical application in the site.

Key words relay protection; standardized operation card; on-load test

中图分类号: TM835 **文献标识码:** B **文章编号:** 1003-6954(2009)03-0044-01

随着电力系统飞速发展, 对继电保护的选择性、速动性、灵敏性、可靠性提出了更高的要求, 但对于继电保护而言, 要正确动作, 电流、电压等外部回路正确接入是最基础的工作。如何来验证装置接线的正确性, 除投运前进行模拟试验外, “带负荷测试”便成了确保继电保护装置接线正确并安全稳定投入运行的最后一道防线。近年来, 由于继电保护专业技术人员不断更新, 新进人员对现场工作的程序不够了解, 测试工作往往出现漏项或数据分析不准确的现象, 从而给安全生产造成隐患。为了杜绝此种错误的发生, 应细化《标准化作业卡》的每个步骤。

下面以“110 kV 线路带负荷测试”为例, 谈谈“线路保护带负荷测试”工作的一般步骤和方法; 以促进完善“现场标准化作业卡”的编制与现场实际运用。

1 标准化作业卡的编制

标准化作业卡编制的首要项目为: “现场勘察”, 只有经过仔细周密的现场勘察, 编写出的“标准化作业卡”对工作才会具有实际指导意义。“现场勘察”的主要内容应包括:

(1) 工作内容。确保工作班成员都明确自己将要面临什么工作。

(2) 待测试设备所在位置。

例如: “110 kV 线路带负荷测试”除本线路保护装置外还应包括与该线路有关的母差、录波、测量以及计量等设备的位置。必要时附图说明, 避免在测试过程中盲目和随意的工作而出现测试项目遗漏。

(3) 危险点和安全措施分析。让整个测试过程做到可控、能控、在控。

标准化作业卡填写数据表格应根据现场实际情况制定, 便于工作人员对测试数据的填写和数据分析。

2 线路带负荷测试的标准化作业过程

例: 某 110 kV 线路带负荷测试; 当时该线路潮流为: $P=+40\text{ MW}$; $Q=-10\text{ Mvar}$ (母线向线路送出为“+”; 线路向母线送入为“-”; TA 变比为: 600/5)。

(1) 首要任务: 对照《标准化作业卡》中所列工作位置, 迅速检查每个待测试设备电流幅值是否正常, 如果发现某一设备的某相无电流, 应怀疑该 TA 二次绕组存在开路现象, 此时应第一时间进行处理, 避免设备的损坏。

(2) 数据分析: 将母线看成一个点; 该母线的各元件应有 $\sum P=0$; $\sum Q=0$; $\sum I=0$ 。根据以上原理, 在被测线路带上负荷后, 通过母线上其他元件的有功、无功, 可以得出被测试线路的有功、无功 (一定要注明有功、无功的正负, 有必要时应向调度核实)。利用这些数据将做以下计算, 并将计算结果记录于《标准化作业卡》相应的表格中便于分析。

①功率因数: $\cos\varphi = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} = \frac{40}{\sqrt{40^2 + 1^2}} = 0.97$;

②电流一次值: $I = \frac{P}{\sqrt{3}U\cos\varphi} = \frac{40\ 000}{\sqrt{3} \times 112 \times 0.97} = 212\text{ A}$

(下转第 67 页)

辑进行,尤其应注意对备自投闭锁逻辑的试验;备投电压一般是直接从小母线引进装置,而母线全部停电的时候很少,因此需要将电压引进装置的线开掉,这时是不停电的带电作业,必须加强监护,而且要进行记录和包裹;试验备投逻辑动作前,应将备投装置上运行设备的跳合闸压板退掉,如对压板还较模糊,没有十足把握,就断掉运行设备的跳合闸连接线;做有无流判据试验时,如该线路处于运行中,必须在装置前将电流回路短接,短接需可靠;试验动作前,应通知联跳回路上的工作人员,以免对其他人员造成伤害。

5)需要停用备自投装置时,应先退出装置的出口压板,再退装置的直流电源,最后退出装置的交流电源;装置投运时,操作顺序恰好相反。

(上接第 44 页)

(U 采用当时母线电压一次值)

$$\textcircled{3} \text{ 电流二次值: } I = \frac{\text{电流一次值}}{\text{TA 变比}} = \frac{212}{120} = 1.77 \text{ A}$$

$$\textcircled{4} \text{ 电压电流夹角: } \varphi = \arccos 0.97 = 14^\circ$$

(由于有功 P 为正;无功为负,因此电压超前电流夹角 $\varphi = 360^\circ - 14^\circ = 346^\circ$ 或电流超前电压 14° (如图 1)。

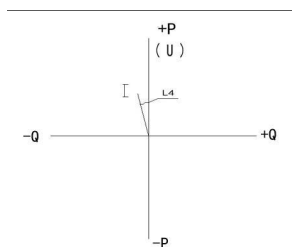


图 1 功角关系图

(3)利用理论计算得出的以上数据为参考,进行检查:

①电流幅值检查以及核实 TA 变比:用相位测试仪在保护屏端子排依次测出 a 相、b 相、c 相、n 相电流幅值,并记录。与计算出的理论值做比较应基本相等。如果误差较大则有可能:1)某一相 TA 变比接错。如该相 TA 二次绕组抽头接错;TA 的一次线未按整定变比进行串联或并联。2)某一相电流存在两点接地,如某一根电缆芯绝缘损伤,分流造成保护屏的电流减小。

②功率方向检查:带方向保护引入电压作参考量,用以判别故障点的正反向(电压接入的正确性应在带负荷之前进行检查。这里不再论述。),用相位

4 结束语

随着电网规模的不断扩大,网络结构的日益复杂,微机型备用电源自投装置已广泛应用于 110 kV 变电站、35 kV 变电站及 10 kV 开关站。它在防止系统稳定破坏或事故扩大,造成大面积停电,或对重要用户的供电长时间中断等方面的作用已日渐明显。对备用电源自投装置应用中相关问题的分析研究,能对实际的运行维护工作提供一些有用的参考,也对系统的安全、稳定、可靠、经济的运行具有实际价值。

(收稿日期:2009-01-09)

测试仪测试同名相电压电流夹角,并记录。检查方向指向是否正确,即 $\angle(U_A - I_A)$ 、 $\angle(U_B - I_B)$ 、 $\angle(U_C - I_C)$,测试出的角度应等于理论值。如果误差较大则有可能:该条线路开关 TA 二次绕组极性接反。另外,现在多数微机保护中零序功率方向均采用自产 $3U_0$ 、 $3I_0$,因而其方向正确性可以靠同名相电压电流夹角来保证。

③按上述方法,对照《标准化作业卡》顺序依次对与该线路有关的录波、110 kV 母差、测量、计量回路进行测试并认真记录相关数据。

3 结 语

现场工作虽然十分繁琐,但只要每项工作开始前认真做好现场勘察,制定符合现场实际情况的《标准化作业卡》并认真执行,再复杂的工作都会顺利完成。

参考文献

- [1] 朱声石. 继电保护原理与技术 [M]. 电力工业出版社.
- [2] 山东工学院, 山东电力局. 电力系统继电保护 [M]. 水利电力出版社.

(收稿日期:2008-12-18)

变压器出口短路的危害及预防措施

徐克华

(广安电业局, 四川 广安 638500)

摘 要: 电力变压器是电力网络中的核心设备之一, 因而其稳定、可靠运行将对电力系统安全起到非常重要的作用, 变压器发生近区短路将对其产生很大的危害, 为防止变压器出现近区短路, 提出了相应的技术措施和管理措施。

关键词: 变压器; 近区短路; 技术措施; 管理措施

Abstract: Power transformer is one of the key equipment of power grid, so its steady and reliable operation will play an important role in the safety of power system. When near-by short circuit occurs in the transformer, it may cause a serious damage to power system. In order to prevent the near-by short-circuit of transformer, the relevant technical measures and management measures are proposed.

Key words: transformer; near-by short-circuit; technical measure; management measure

中图分类号: TM406 **文献标识码:** B **文章编号:** 1003-6954(2009)03-0045-03

电力变压器是电力网络中的核心设备之一, 因而其稳定、可靠运行将对电力系统安全起到非常重要的作用。然而, 由于设计制造技术、工艺以及运行维护水平的限制, 变压器的故障还是时有发生, 尤其是近年来逐步引起人们重视的变压器近区或出口短路(以下简称出口短路)故障, 大大影响了电力系统的安全稳定运行。

查询相关资料表明, 在变压器损坏的原因中, 80%以上是由于变压器发生了出口短路的大电流冲击造成的。因此, 加强变压器的运行维护, 采取切实有效措施防止变压器出口短路, 对确保变压器的安全稳定运行有重要的意义。

1 变压器出口短路的危害

电力变压器在发生出口短路时的电动力和机械力的作用下, 绕组的尺寸或形状发生不可逆的变化, 产生绕组变形。绕组变形包括轴向和径向尺寸的变化, 器身位移, 绕组扭曲、鼓包和匝间短路等, 是电力系统安全运行的一大隐患。变压器绕组变形后, 有的会立即发生损坏事故, 更多的则是仍能继续运行一段时间, 运行时间的长短取决于变形的严重程度和部位。显然, 这种变压器是带“病”运行, 具有故障隐患。这是因为:

(1) 绕组机械性能下降, 当再次遭受到短路电流

冲击时, 将承受不住巨大的冲击电动力的作用而发生损坏事故。例如, 某台 40 MVA、110 kV 的电力变压器, 低压侧遭受短路冲击后, 常规试验没有发现异常现象; 投入运行后 1 年, 在一次短路事故中损坏。

(2) 绝缘距离发生变化或固体绝缘受到损伤, 导致局部放电发生, 当遇到过电压作用时, 绕组便有可能发生饼间或匝间短路导致变压器绝缘击穿事故。或者在正常运行电压下, 因局部放电的长期作用, 绝缘损伤部位逐渐扩大, 最终导致变压器发生绝缘击穿事故。例如, 某台 150 MVA、220 kV 的电力变压器, 低压侧短路后, 用常规试验方法没有发现问题, 投入运行后 6 个月, 突然发生损坏事故。

(3) 累积效应。运行经验表明, 运行变压器一旦发生绕组变形, 将导致累积效应, 出现恶性循环。例如, 某台 31.5 MVA、110 kV 的电力变压器, 在运行的 5 年中, 10 kV 侧曾遭受多次冲击, 经吊罩检查发现其内部绕组已存在严重变形现象。若不是及时发现绕组变形, 很难说在什么时候这台电力变压器就会发生事故。再如, 某变电站的一台 40 MVA、110 kV 电力变压器发生短路后速断保护跳开三侧断路器, 经预防性试验合格再投运 1 个月后, 油中特征气体增长。一停运检修发现 35 kV 绕组已整体变形, 包括 10 kV 绕组多处有露铜, 导线有烧融现象。因此, 对于绕组已有变形但仍在运行的电力变压器来说, 虽然并不意味着会立即发生绝缘击穿事故, 但根据变形情况不

同,当再次遭受并不大的过电流或过电压,甚至在正常运行的铁磁振动作用下,也可能导致绝缘击穿事故。所以,在有的所谓“雷击”或“突发”事故中,很可能隐藏着绕组变形的故障因素。

2 防止变压器出口短路的技术措施

(1)变压器的中低压侧加装绝缘热缩套。对变压器的中、低压侧电压等级是 35 kV 及以下的,只要其出线采用的是硬母线,可以从变压器出口接线桩头一直到开关柜的母线,包括开关室内高压开关柜底部母排,全部加装绝缘热缩套。如果采用的是软母线,可在变压器出口接线桩头和穿墙套管附近加装绝缘热缩套。这样可有效防止小动物等造成的变压器出口短路。

(2)对变压器的中、低压侧为 35 kV 或 10 kV 电压等级的变压器,由于其中性点属于小电流接地系统,所以要采取有效措施防止单相接地时发生谐振过电压,从而避免绝缘击穿,造成变压器的出口短路。防止单相接地时发生谐振过电压的措施有:

电压互感器的二次开口三角加装消谐器,如微电脑控制的电子消谐器。广安电业局使用的是 ER-XX 型系列微电脑多功能消谐装置,是抑制铁磁谐振过电压,保护高压熔丝、电压互感器免遭损坏的最理想的自动保护装置。

电压互感器的一次中性点对地加装小电阻或者非线性消谐电阻。广安电业局加装的是 LXQ(D)-10 和 LXQ(D)-35 非线性电阻。

对电容电流超过规程标准的,加装消弧线圈或者自动调谐消弧线圈。

(3)对变压器中、低压侧的支柱瓷瓶(包括高压开关柜)可更换爬距较大的防污瓷瓶,或者涂刷常温固化硅橡胶防污闪涂料(RTV),防止绝缘击穿造成的变压器出口短路。

(4)将变压器中、低压侧的开关更换为开断容量更大的开关,防止因开断容量不足引起开关爆炸造成的变压器出口短路。

(5)对变压器、母线及线路避雷器,要全部更换为性能良好的氧化锌避雷器,提高设备的过电压水平。

(6)不断完善变压器的保护配置。变压器的继电保护尽量采取微机化、双重化,尽可能安装母线差

动保护,失灵保护,提高保护动作的可靠性、灵敏性和速动性。变压器的中低压侧应配置限时速断保护,动作时间应 $<0.5\text{ s}$ 。确保在变压器发生出口短路时,可靠、快速切除故障,减小出口短路对变压器的冲击和损害。

(7)对进线为双电源备用电源自投的 110 kV 变电站,要采取措施防止备用电源自投对故障变压器的再次冲击。

3 防止变压器出口短路的管理措施

(1)加强变压器保护的年检以及继电保护的定值、保护压板的管理工作,确保其动作的正确性,杜绝故障时因保护拒动对变压器造成的损害。

(2)设定科学合理的计算保护定值,消除保护“死区”,快速切除流过变压器的故障电流。例如,对于变压器的过流保护(后备保护),应该缩短动作时间,在满足与下一级保护配合的选择性条件下,越短越好,最长也不应该大于 2 s 以减小过电流对变压器的冲击。对于终端变电所,电源侧线路保护定值可延伸到终端变的变压器内部,以增加保护动作的可靠性。

(3)对抗外部短路强度较差的变压器或者受过出口短路冲击发生变形的变压器,对于系统短路跳闸后的自动重合或强行投运,应看到其不利的因素。因此,应根据短路故障是否能瞬时自动消除的概率,对近区架空线(如 2 km 以内)或电缆线路取消使用自动重合闸,或适当延长合闸间隔时间以减少因重合闸不成而带来的危害,并且尽量对短路跳闸的变压器进行试验检查。否则有时会加剧变压器的损坏程度,甚至失去重新修复的可能。

(4)加强对线路的巡视,发现长高的树木等及时砍伐,防止线路接地造成的变压器出口短路或者引起的过电压。

(5)加强电缆沟封堵,严防小动物进入开关室,避免小动物引起的单相接地造成变压器的出口短路,也避免其引起的过电压对变压器的损害。

(6)对于全封闭的开关室,加装排气扇通风,或者安装抽湿机,始终保持开关室的干燥,防止设备凝露及污闪事故造成的变压器出口短路。

(7)加强对变压器出口处避雷器的预试和运行维护,确保其对因雷击等产生的过电压的吸收,防止

避雷器损坏造成的变压器出口短路。

(8)加强变电设备的运行管理,及时发现设备缺陷,保证变压器的正常运行。

(9)加强技术监督工作,严禁设备超周期运行,对室内母线及瓷瓶定期清扫,及时进行耐压试验,确保设备绝缘良好。

(10)每年安排 2 次以上的设备红外线普测,积极开展避雷器在线监测、绝缘在线监测、高压开关 SF₆ 气体在线监测等项目,及时掌握设备运行状况。

(11)对新投运的变压器和未作过变形测试的变

压器全部做一次变形测试,保留测试数据,这样,在变压器遭受出口短路冲击后,可以此作为基础数据判断变压器变形程度,认定变压器能否继续运行。对未发生明显绕组变形的变压器,及时投入运行,不仅节省了大量的人力、物力和财力,还大大缩短了检修周期。

(12)加强电网规划、建设的科学管理,合理安排运行方式,限制短路电流,减小出口短路对变压器造成的损害。

(收稿日期: 2009—02—13)

(上接第 15 页)

由表 1 可得,支路 4 突然断开时,实际测量值为零,结果,依据式 (1),产生了较大的新息值,但不能由此断定支路 4 发生了拓扑错误。应根据差别向量判断是否存在坏数据,并判定其位置。差别向量一系列数据表明,不存在不良回路,因而,连支上的新息值是准确的;支路 2 对应所选树的树支,鉴于较大的差别向量值,判定其上有功量测为坏数据;完全符合仿真条件,且整个判定过程只需要输入量测数据,便可由所编制的程序快速自动完成计算;计算过程不涉及迭代,所以没有收敛问题,以及重新计算的时间问题。

4 结束语

所采用的新息图法^[6]是一种状态估计前的不良数据检测和辨识新方法,能有效的避免残差污染和淹没,同时不用进行重复繁琐迭代计算过程,节省时间。通过基于 IEEE—14 节点系统的仿真实验,充分验证了所用方法的实用性、高效性,以及对估计前检测和辨识方法的贡献。

文中具体的算法及程序在实现过程中,采用了手动(如输入量测数据等步骤)与电脑自动完成相结合的方式;当实际工程应用中,其完全可以通过相应的数据采集、输入输出接口程序的整合,会同核心的 Matlab 程序,得以实现。如何快速变换树的结构,以及快速表述出连支与整个拓扑系统的关联关系,是一个值得进行系统和完善的研究课题。

参考文献

- [1] 于尔铿. 电力系统状态估计 [M]. 北京: 水利电力出版社, 1985.
- [2] 刘广一, 于尔铿, 夏祖治. 状态估计中不良数据可检测及可辨识性的定量分析理论 [J]. 电力系统自动化, 1991, 15(1): 22—26.
- [3] 刘广一, 于尔铿, 夏祖治. 量测系统误差方估计与修正 [J]. 中国电机工程学报, 1990, 10(6): 31—38.
- [4] Souza J C S, Leite da Silva A M, Alves da Silva A P. information debugging in forecasting—Aided state estimation using a pattern analysis approach [J]. In: 12th PSCC, Dresden, 1996. 8.
- [5] Salehfar H, Zhao R. A neural network pre—estimation filter for bad data detection and identification in power system state estimation [J]. Electric power system research, 1995, 34: 127—134.
- [6] 周苏荃, 柳焯. 新息图法拓扑错误辨识 [J]. 电力系统自动化, 2000, 24(4): 23—27.

作者简介:

张永超 (1979—), 男, 硕士研究生, 从事电力系统状态估计方面的研究工作。

黄彦全 (1961—), 男, 博士, 教授, 从事电力系统状态估计、微机保护和变电站综合自动化方面的研究和教学工作。

宋廷珍 (1980—), 男, 硕士研究生, 从事电力系统继电保护方面的研究工作。

穆亚东 (1980—), 男, 硕士研究生, 从事电力系统自动化检测方面的研究工作。

(收稿日期: 2009—04—08)

变压器绕组变形监测的研究现状综述

诸 兵, 曾雪梅, 黄晓艳

(自贡电业局调度局, 四川 自贡 643000)

摘 要: 电力变压器是电网中最为重要、昂贵的设备之一, 它的安全稳定运行对整个电网的安全意义极其重大。但是由于受到短路电流冲击等各种因素的影响, 变压器绕组可能发生变形, 而且不易被发现。全面介绍了目前变压器绕组变形检测的研究现状, 详细分析了目前变压器绕组变形监测的几种方法及其优缺点。

关键词: 电力变压器; 绕组变形; 检测

Abstract: Power transformer is one of the most important and expensive equipment in power grid whose safe operation is very important to the safe operation of the whole grid. But the power transformer winding may be distorted and it can not be found easily under the influence of short-circuit current impact. The research status of winding deformation detection is introduced totally. Several methods of monitoring power transformer winding deformation are analyzed in detail as well as their strong and weak points.

Key words: power transformer; winding deformation; detection

中图分类号: TM406 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)03-0048-06

在电力系统的各种设备中, 如果一台大型电力变压器在系统中运行时发生事故, 则很可能导致大面积停电, 其检修期一般在半年以上, 不但花费巨大, 而且影响面很广。据有关变压器的故障资料的分析表明, 绕组是发生故障较多的部件之一。对引发故障的原因进行统计表明: 出口短路引起变压器损坏事故的比例在 110 kV 以上等级变压器事故中占较大比例, 而短路电流正是引起变压器绕组变形的最主要原因。据统计, 绕组在电动力作用下发生机械变形导致的严重故障占绕组总事故的 70%^[1]。

由于短路冲击电流引起的绕组变形并非总能马上导致保护动作, 绕组已发生变形的变压器常会在相当长时间内继续运行, 如不能得到适时的维修, 累积效应会进一步发展, 即使不再出现短路事故, 也会导致变压器非正常地退出运行。但是常规的电气试验很难发现变压器的绕组变形的情况, 而吊心检查需要花费较大的人力、物力, 并且对于变压器内侧绕组变形也不容易发现。正确及时的变形检测与诊断不但能保证变压器故障元件得到及时的替换, 无故障元件得到最大限度的使用和延长变压器的实际使用寿命, 还可以最大限度地避免由于变压器的绕组故障隐患加重而导致的变压器非正常退出运行和由此而产生的大面积停电事故。因此对变压器不吊心的情况下判断变压器绕组是否变形对提高电网安全、稳定供电

和事故时快速恢复供电有重要意义。国内外在这方面做了很多研究工作, 也提出了一些方法, 有的还运用于实际中。目前国内外主要采用的诊断方法有低压脉冲法、频率响应法、短路电抗法和振动检测法。下面分别介绍这几种方法。

1 低压脉冲法

低压脉冲法 (Low Voltage Impulse) 简称 LVI 法。它是将持续时间很短 (如 0.1/5、0.3/1.5、0.1/1.0 μs)、重复频率为 1 000 Hz 或更高的脉冲加到被试变压器的一端, 同时记录该端和另一端上的电压波形, 则响应信号在变压器绕组变形前后的变化就可以反映出绕组形变的信息。

由电路理论可知: 一个无源、线性、单输入、单输出的网络特性可以用传递函数 $H(j\omega)$ 或 $h(t)$ 来描述。由于当所加信号的频率超过 1 kHz 时变压器的铁心基本不起作用, 所以变压器可以看作一个由线性电阻、电感和电容所组成的网络, 若忽视绕组的电阻, 则变压器绕组的等值电路图如图 1。

图 1 可以看出变压器的等效电路是一个无源线性、单端口输入、单端口输出的网络。当变压器发生线饼间的相对位移或线饼变形时, 变压器绕组等效电

路中的单位长度内的分布参数 L 、 C_1 、 C 将发生改变。而随着网络参数的改变,其频率特性也随之改变。因此,如果将一相同的低压脉冲信号施加于变压器绕组上,则响应信号在变压器绕组变形前后的变化也能反映出绕组变形的信息,这就是传统的低压脉冲法的监测原理^[2~4]。

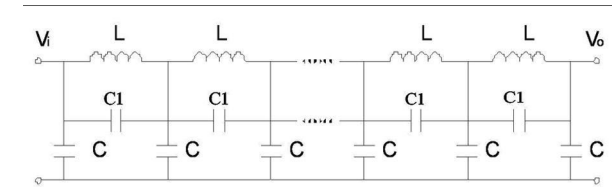


图 1 单相变压器高频等效电路图

文献 [5] 提出的方法对传统的低压脉冲法作了一些改进。传统的低压脉冲法采用模拟示波器记录绕组的低压脉冲响应,并从时域响应波形的变化来判断变压器绕组有无变形。随着计算机技术及数字存储技术的发展,将时域信号以数字形式记录并传输给计算机做各种分析处理越来越显示出其优越性。例如对数字形式的信号可进行平滑、滤波、频谱分析、相关分析及传递函数分析等。这些分析手段的引入较之单纯的时域分析能更有效地提取信号特征,更准确地对信号畸变的原因给出判断。因此采用了以计算机为中心的低压脉冲法绕组变形测试系统。如图 2 所示。

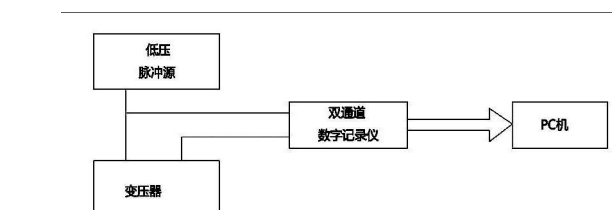


图 2 LVI 测试法接线框图

其中低压脉冲源产生幅值 800 V、前沿 0.25 μ s 半幅宽 2.5 μ s 的单极性脉冲电压信号。数据采集单元为两通道、8 位、20 ms/s 采样率的数据采集板,直接插在 PC 机扩展槽内。对施加在变压器绕组上的低压脉冲信号及响应信号进行记录,并将数据传输给计算机。计算机软件对采集到的输入、输出信号进行处理、分析,并将信号曲线进行显示或以硬拷贝形式输出。

2 频率响应分析法

频率响应分析法 (Frequency Response Analysis)

简称 FRA 法。它是 1978 年加拿大 E. P. Dick 提出来的^[6],现在在世界各国得到广泛应用。CIGRE (International Council On Large Electric Systems) 的变压器委员会推荐的变压器绕组变形诊断方法为频率响应法。

频率响应法的原理是将一扫频信号送入绕组的一个端口,从另一端测量其输出响应,并将各频率点的输入输出之比根据频率描绘成曲线——频谱曲线 (图谱)。通过对绕组的频谱曲线进行对比分析,可以判断绕组的结构变化。另外,可以从绕组的频率响应图谱,对绕组的防雷特性及防雷水平做出估计。从前面可知,当频率超过 1 kHz 时,变压器绕组可以被看作是一个由多个电容和电感组成的无源二端口网络。当频率较低时,感抗较小,容抗较大,电感起主要作用,电路呈感性;随着频率的增加,感抗变大,容抗变小,二者同时起作用;当频率继续增加时,电容起主要作用。

绕组中电压分布不均匀,在某一频率下会达到极端情况,即产生谐振时,电压会出现极不均匀分布,在频谱图上表现为峰和谷。当然不同的峰谷及峰谷的高低、分布曲线的描述也不一样。频谱图实际上是描述了变压器绕组在不同频率下电压分布不均匀的情况。绕组的频谱曲线中出现若干峰值点和谷点。这些峰点和谷点是在不同频率下绕组中出现谐振的结果,其中峰点是发生串联谐振的结果,谷点是发生并联谐振的结果。

谐振是由绕组电感和饼间电容及对地分布电容等引起的。对于一给定绕组,它的频谱曲线是确定的。而当绕组因某种因素发生变形时,其分布参数发生变化,改变了绕组部分电感或电容,即改变了绕组的转移阻抗,这时测得的频谱曲线,就会与正常时测得的频谱曲线不同。这种差异反映了绕组结构的变化。分析这种差异,就可以分析出绕组的变形情况^[7~10]。

频率响应分析法诊断变压器绕组变形的主要原理是建立在比较绕组频率响应特性变化的基础上的,即相当于比较变压器绕组的结构特征“指纹”图。具体而言,是通过对不同曲线的谐振点的个数、位置、幅值、趋势等来判断曲线间的相似程度,即一致性。为了定量表示曲线的相近程度,引入了相关系数 R 作为量化结果来表示所比较特性曲线的相近程度, R 值越大表示曲线的相似程度越好。

相关系数 R 可按照下列公式计算。设有 2 个长度为 N 的传递函数幅度序列 $X(k)$ 和 $Y(k)$, $k=0, 1, \dots, N-1$ 且 $X(k)$ 和 $Y(k)$ 为实数。

(1) 计算 2 个序列的标准方差

$$D_x = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \left[X(k) - \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X(k) \right]^2 \quad (1)$$

$$D_y = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \left[Y(k) - \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} Y(k) \right]^2 \quad (2)$$

(2) 计算 2 个序列的协方差

$$C_{xy} = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \left[\left[X(k) - \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X(k) \right] \cdot \left[Y(k) - \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} Y(k) \right] \right] \quad (3)$$

(3) 计算 2 个序列的归一化协方差系数

$$I_{R_{xy}} = \frac{C_{xy}}{\sqrt{D_x D_y}} \quad (4)$$

(4) 按照如下公式计算出符合工程需要的相关系数

$$R_{xy} = \begin{cases} 10 & 1 - I_{R_{xy}} < e^{-10} \\ -1 \lg(1 - I_{R_{xy}}) & \text{其它} \end{cases} \quad (5)$$

通过大量测试分析及结合变压器吊检结果, 得出相关系数与曲线相似的关系如下: 一般而言, $R > 1.0$ 则认为曲线相似程度好; $R < 0.6$ 则认为曲线相异很大; $0.6 < R < 1.0$ 则认为曲线轻度相异。对同一台变压器的同一相前后两次测试图谱进行比较, 特别是与投运前新变压器所测的特征图谱进行比较, 来判断变压器是否存在绕组变形, 称为纵向比较法; 以同一台变压器的 A、B、C 三相图谱进行比较, 或同型号变压器的同一相图谱进行比较, 以此判断其是否存在绕组变形, 则称为横向比较法。对于大部分缺乏原始特征图谱的变压器, 在实际工作中需要更多地使用横向比较法。

以 A、B、C 三相图谱的差异来判断绕组是否变形, 其理由是对于制造工艺良好的变压器, 其三相绕组的结构基本是一致的, 因此三相图谱也是一致的。以同厂同型变压器的图谱进行比较, 其理由是同厂家同型号的产品, 其设计水平和制造工艺是相对固定的, 绕组的结构也是相似的, 因此其特征图谱具有一致性。在现场工作中, 往往同一个变电站的几台变压器采用的是同厂同型的产品, 通过测量和比较这些变压器的图谱, 则可以避免或减少误判。前期的变压器绕组变形测试工作由于缺乏变压器的原始“指纹”图, 因此应采用横向比较法作为分析的主要手段^[11]。

3 短路电抗分析法

变压器短路阻抗是当负载阻抗为零时, 变压器内部的等值阻抗。短路阻抗的电抗分量, 即短路电抗, 就是绕组的漏电抗。由变压器的理论分析可知, 变压器绕组的漏电抗由纵向漏电抗和横向漏电抗两部分组成。一般情况下, 横向漏电抗比纵向漏电抗小得多。无论是横向漏电抗还是纵向漏电抗, 其电抗值都是由绕组的几何尺寸所决定的。也就是说, 在工作频率一定的情况下, 变压器的短路电抗是由绕组的结构所决定的, 其可由短路阻抗求出。对于一台变压器而言, 当绕组变形、几何尺寸发生变化时, 其短路电抗值也要变化。反之, 如果运行中的变压器受到了短路电流的冲击, 为了检查其绕组是否变形, 可将短路前后的短路电抗值加以比较来判断。如果短路后的短路电抗值变化很小, 则可认为绕组没有变形; 如果变化较大, 则可认为绕组有显著变形。所以, 有关标准规定, 变压器在进行短路试验前后, 都要求测量每一相的短路阻抗, 并把试验前后所测量的电抗值加以比较, 根据其变化的程度, 作为判断被试变压器是否合格的重要依据之一^[12~14]。

短路实验法的原理接线图如图 3 所示:

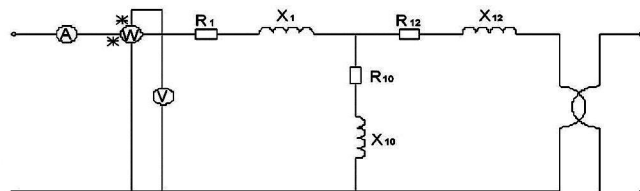


图 3 短路实验法的接线原理图

图中, 功率表 W 测量的是有功功率, 伏特表 V 测量的是电压的有效值, 安培表测量的是电流的有效值。一般由于 R_{10} 和 X_{10} 在数值上相对于 $R_1 + R_{12}$ 和 $X_1 + X_{12}$ 而言很大, 计算时可以忽略不计。由图 4 可得:

$$Z_k = |R_1 + X_1 + R_{12} + X_{12}|$$

$$= \sqrt{(R_1 + R_{12})^2 + (X_1 + X_{12})^2} = V/I \quad (6)$$

$$R_k = R_1 + R_{12} = p/I^2 \quad (7)$$

$$X_k = X_1 + X_{12} = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2} \quad (8)$$

由上面 3 式可以计算到短路电抗 X_k , 通过短路电抗值的变化就可以判定绕组的状态。对于实验前后变压器的短路电抗值的变化范围, 国家标准和 IEC

都以电力变压器耐受短路试验前后的短路电抗的变化不超过某一限值作为变压器耐受短路能力的判据,如普遍使用的同心式绕组,短路电抗的变化不能超过 2%,箔式和短路电抗 3% 以上者不能超过 4%^[15]。理论和实践都说明,测量短路电抗是判断变压器绕组变形的一种有效方法。

3.1 变压器的振动机理分析

3.1.1 变压器铁心的振动

国内外的研究表明铁心的振动来源于:

① 硅钢片的磁致伸缩引起的铁心振动

② 硅钢片接缝处和叠片之间存在漏磁而产生的电磁吸引力引起的振动。

近年来由于铁心制造工艺和结构上的改进以及铁心工作磁密的降低,使硅钢片接缝处和叠片间的电磁力引起的铁心振动很小。因此可以认为,铁心的振动主要取决于硅钢片的磁致伸缩。下面简介磁致伸缩的原理^[16]。

铁磁晶体在外磁场中被磁化时,其长度及体积均发生变化,这种现象称为磁致伸缩或磁致伸缩效应。磁致伸缩与磁感应强度平方成正比,磁致伸缩的变化周期为电源电流周期的一半,故磁致伸缩引起的铁心振动是以两倍的电源频率为基频的。

3.1.2 变压器绕组的振动

绕组的振动是由于电流流过绕组时在绕组间、线饼间、线匝间产生的动态电磁力引起绕组的振动。变压器绕组在负载电流与漏磁产生的电动力作用下振动,并通过绝缘油传至油箱。如高、低压绕组之一变形、位移或崩塌,绕组间压紧不够,使高、低压绕组间高度差逐渐扩大,绕组安匝不平衡加剧,漏磁造成的轴向力增大,则绕组振动加剧。

变压器绕组及铁心的振动会通过变压器油和支撑部件传到油箱壁上,所以通过监测变压器油箱壁上的振动就可以反映出绕组和铁心的振动^[17~19]。

3.2 传感器位置的选择

在油箱表面安装传感器的位置选择原则是使在此处测得的振动信号最接近变压器绕组和铁心的振动信号且振动信号最强,以确保所采集的信号能真实地反映绕组和铁心的振动状况。绕组的振动可分为径向和轴向两个方向。径向振动信号的测试位置选择在油箱侧面,靠近变压器的上下端部,即图 4 中的 ac2、ac3。这样可以获得较强的径向振动信号^[20]。轴向振动信号的测试位置选择在油箱底部靠近铁心

的地方,这样测得的绕组和铁心的轴向振动信号最强,即图 4 中的 ac1^[21]。

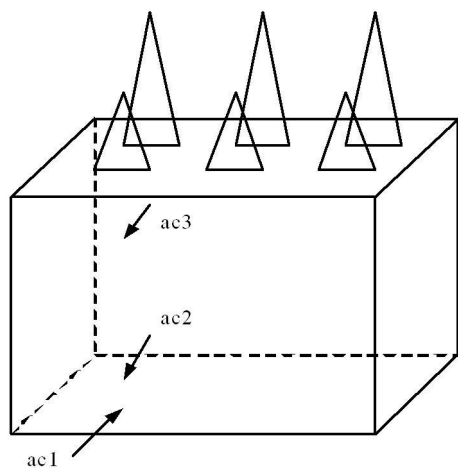


图 4 振动传感器在变压器器身上的位置

对于已经叠压成形的变压器铁心,因磁致伸缩引起的铁心振动加速度信号基频成分与空载电压值的平方呈线性关系,且铁心振动加速度信号的基频是空载电压基频的两倍。另外,因铁心磁致伸缩的非线性以及沿铁心内框和外框的磁通路径长短不同等原因,铁心振动频谱中除了基频外,还包含有高次谐波成分。

3.3 变压器绕组的振动特征

绕组的振动是负载电流和漏磁相作用所产生的。在负载电流频率为 50 Hz 的情况下,变压器绕组的振动频率是以两倍电流频率 (100 Hz) 为基频的。绕组振动基频 (100 Hz) 加速度的幅值和 I^2 成线性关系。除了 100 Hz 的基频外,还有高次谐波。当变压器绕组发生变形或松散失稳时,绕组的振动加速信号将会发生显著变化。由于 300~500 Hz 的频率成分很小且其幅值随绕组压紧力变化也小。只讨论 100 Hz 和 200 Hz 频率分量。100 Hz 和 200 Hz 振动分量随电流 I 的变化规律为:① 绕组振动加速度信号基频 (100 Hz) 的幅值和基本成线性关系;② 振动信号的 200 Hz 谐波幅值和 I^2 不是线性关系,而随 I 的增大而增大;③ 100 Hz 处,绕组压紧时振动信号加速度幅值比松动时高;200 Hz 处情况则相反^[2]。

良好状态的变压器振动的特征向量可作为指纹量留用 (可作为指纹量的特征向量,包括附载电流大小、绕组和铁心振动信号的频谱、功率谱、能量谱等),由上述分析可以看出变压器绕组及铁心压紧状况的变化和绕组的位移及变形将引起作为指纹量的特征向量的变化,因而可在线、及时地给出有关变压

器铁心及绕组状况的指示,一旦变压器发生故障,由当前特征向量与指纹量比较就可快速反映出来。

4 结 论

(1)低压脉冲法在试验测试过程中,测量方法较为复杂,两次测量时间间隔较长,抗电磁干扰影响能力很差,且对绕组首端部位的变形响应不灵敏,很难判定绕组变形的位臵,而现场运行环境中电磁干扰相当大,屏蔽测试系统将会带来很大困难,再加上仪器笨重,测试电压很高,因此未受到广泛关注和推广。

(2)频率响应法因其检测灵敏度高、设备轻便、适合于现场测试,在国内外已经得到了较广泛的现场应用,但由于频率特性受干扰因素很多,其诊断的不确定性还相当明显,使用方法不当会使结果严重失真,有关的测试和判断方法也尚无统一的标准可依。

(3)短路阻抗作为变压器重要参数,不但在变压器投入运行前要测量,而且在运行过程中也要定期或不定期的测量。作为监测变压器绕组状态的重要手段之一,该方法测试程序较简单,有确定的判断标准,IEC 和国标准规定了较为可行的建议性判据,但是由于试验电源容量大、试验设备沉重、试验花费时间较长等因素影响,短路阻抗法在现场使用中受到了限制。

(4)振动监测法的优点是可以做到在线监测,并且振动法在线监测是通过贴在变压器油箱壁上的传感器来监测其运行状况,与整个电力系统没有电气连接,对整个电力系统的运行无任何影响。但是由于变压器的振动信号受变压器的运行方式、变压器制造工艺和环境温度影响很大,因此目前还缺乏通用的判断标准。

参考文献

- [1] 徐大可. 监测变压器绕组变形的短路电抗在线测量技术 [D]. 西安交通大学博士论文, 2001. 3
- [2] 王钰, 徐大可, 李彦明, 张成良. 检测变压器绕组变形的低压脉冲法测试系统研究 [J]. 高电压技术, 1998, 24(3): 24—27.
- [3] Wang M, Vandemaar A J, srivastava K D. Improved detection of power transformer Winding movement by extending

the FRA high frequency range IEEE Trans on PWRD, 2005, 20(3): 1930—1938.

- [4] Drobyshevski A. A. Assessment of transformer winding mechanical condition by low voltage impulse method Power Tech Conference Proceedings 2003 IEEE Bologna volume 2, June 2003.
- [5] 秦少臻, 王钰, 李彦明. 监测变压器绕组变形的低压脉冲法的研究 [J]. 变压器, 1997(7): 24—29.
- [6] Dick E P, Erven C C. Transformer Diagnostic Testing by Frequency Analysis IEEE Trans on Power Apparatus and Systems 1978, 97(6).
- [7] 舒乃秋, 武剑利, 王晓琪. 频率响应分析法检测电力变压器绕组变形的理论研究 [J]. 变压器, 2005(10): 23—25.
- [8] Liu Xiaowei Sun Qiang. Test research on power transformer winding deformation by FRA method Electrical Insulation Materials 2001.
- [9] 戴文进, 刘保彬. 用频率法检测变压器绕组的变形 [J]. 高压电器, 2004(6): 464—465.
- [10] Ryder S A. Diagnosing transformer faults using frequency response analysis IEEE Electrical Insulation Magazine 2003, 19(2): 16—22.
- [11] 姚森敬, 欧阳旭东, 林春耀. 电力变压器绕组变形诊断分析 [J]. 电力系统自动化, 2005, 29(18): 95—98.
- [12] 曾刚远. 测量短路电抗是判断变压器绕组变形的有效方法 [J]. 变压器, 1998, 35(8): 13—17.
- [13] 高朝霞, 马涛, 王永儿, 汲胜昌. 短路阻抗法结合频率诊断变压器绕组变形的分析与应用 [J]. 电力设备, 2006, 7(12): 32—34.
- [14] 张琛. 变压器绕组变形的测试方法及应用 [J]. 变压器, 2007(2): 35—37.
- [15] 许婧, 王晶, 高峰, 束洪春. 电力设备状态检修技术综述 [J]. 电网技术, 2000(8): 48—52.
- [16] 宛德福. 磁性理论及其应用 [M]. 华中理工大学出版社, 1996.
- [17] 汲胜昌, 刘味果, 李彦明, 徐大可. 变压器铁心及绕组状况的振动测试系统 [J]. 高电压技术, 2000(6): 1—3.
- [18] Rusov V A. monitoring clamping forces in windings and cores of large power transformer using their vibration characteristics. Electric power plants 1998, 6: 53—57.
- [19] 汲胜昌, 程锦, 李彦明. 油浸式电力变压器绕组与铁心振动特性研究 [J]. 西安交通大学学报, 2005(6): 616—619.
- [20] 程锦, 汲胜昌, 刘家齐, 李彦明. 绕组振动信号监测法中测试位臵的影响与分析 [J]. 高电压技术, 2004, 30(10): 46—48.

[21] Belén García Juan Carlos Burgos Ángel Matías Alonso
Transformer Tank Vibration Modeling as a Method of De-
tecting Winding Deformations—Part I: Theoretical Foun-
dation IEEE Trans on Power Delivery, Vol 21, No 1,
January 2006.

[22] 汲胜昌, 王世山, 李清泉, 李彦明, 孙强. 用振动信号分
析法监测变压器绕组状况 [J]. 高电压技术, 2002, 28
(4): 12—13.

作者简介:

诸兵, 男, (1973—), 硕士研究生. 现为四川电力公司自
贡电业局工程师, 主要从事电网运行与调度工作和电气设备
故障监测研究。

曾雪梅, 女, (1968—), 大专, 现为四川电力公司自贡电
业局技师、助理工程师, 从事电网的运行和调度工作。

黄晓艳, 女, (1979—) 年生, 本科, 现为华电内江发电总
厂助理工程师, 从事变电站运行工作。

(收稿日期: 2009—01—05)

(上接第 30 页)

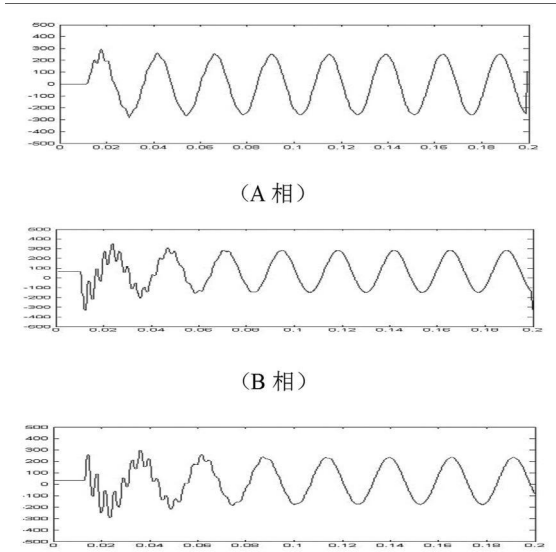


图 7 河北南网黑启动方案线路末端电压仿真图

线路合闸后末端 (西柏坡电厂 220 kV 母线) 单
相过电压波形如图 7 所示。其中 A 相电压最大值
240.3 kV, B 相电压最大值 -351.9 kV, C 相电压最
大值 -308.4 kV, 过电压以 B 相为最大, 过电压倍数
为 1.959。没有超过最大允许过电压倍数, 满足电力
线路运行要求, 此黑启动方案不存在过电压情况。

3 结论与措施

仿真计算结果分析表明, 电力系统在黑启动过程
中对空载输电线路进行合闸操作时存在过电压的可
能。在三相非同期合闸情况下, 线路末端过电压的情
况要高于三相同期合闸的情况, 结合河北南网的实际
情况, 在机组对 220 kV 线路进行空载充电合闸时, 线
路末端出现的过电压情况满足运行要求。但是随电
压等级的提高、线路的增长, 线路末端出现过电压的
概率会增大, 因此要采取有效的措施来抑制过电压情
况: 比如, 并联电抗器投入运行, 使电抗器的感性无功

功率可以对线路的容性无功进行部分补偿, 降低过电
压值; 双回线路投一回; 或者可以采用断路器的合闸
电阻来限制合闸过电压; 还可以通过控制断路器合闸
相角的方法, 即使合闸相角在电压过零点附近, 从而
降低合闸过电压。

参考文献

[1] 房鑫炎, 郁维镛, 熊慧敏, 等. 电力系统黑启动研究 [J].
中国电力, 2000, 33(1): 40—43.

[2] 郭嘉阳, 等. 华北电网“黑启动”实验研究 [J]. 华北电力
技术, 2001, (5): 3—17.

[3] 陈维贤. 电网过电压教程 [M]. 北京: 中国电力出版社,
1996.

[4] 李福寿编著. 电力系统过电压计算 [M]. 北京: 北京水
利电力出版社, 1986.

[5] 解广润, 电力系统过电压 [M]. 北京: 水利电力出版社,
1985.

[6] 顾雪平, 赵书强, 刘艳, 等. 一个实用的电力系统黑启动
决策支持系统 [J]. 电网技术, 2004, 28(9): 54—57.

[7] 张其明, 王万军. 陕西电网黑启动方案研究 [J]. 电网技
术, 2002, 26(4): 42—45.

[8] Gholoaris P. Prousalidis JM, Hatziaargyriou N D. et al. Sin-
ulation of long transmission lines energization for black start
studies [J]. IEEE Tran s on Power Systems 1994, 12
(3): 1093—1096.

[9] 张小易, 顾雪平, 电力系统黑启动过程中过电压问题的
研究 [D]. 华北电力大学硕士论文, 2003.

[10] 张纬钺, 高玉明, 电力系统过电压与绝缘配合 [M]. 北
京: 清华大学出版社, 1988, 112—117.

作者简介:

刘连志 (1982—), 男. 硕士研究生, 主要研究方向 电力
系统安全防御与恢复控制, 人工智能在电力系统中的应用;

赵灿 (1983—), 男, 助理工程师, 从事方向: 变电站运行
与维护管理;

韩振明 (1983—), 男, 助理工程师, 从事方向: 电能计量管理。

(收稿日期: 2009—01—05)

GIS设备选型应注意的问题

张华强¹, 季 枫¹, 肖 伟²

(1 成都电业局, 四川 成都 610021; 2 四川电力试验研究院, 四川 成都 610072)

摘 要:介绍了在 GIS 设备选型时应注意的几点问题, 并详细分析了原因, 为新建 GIS 变电站设备选型提供了参考。
关键词: GIS; SF₆

Abstract: Several problems needing attention in the selection of GIS equipment are introduced and the causes are analyzed in detail which provides a reference for GIS equipment selection in new substation.
Key word: GIS; SF₆

中图分类号: TM561.3 **文献标识码:** B **文章编号:** 1003-6954(2009)03-0054-02

全部或部分采用气体而不采用处于大气压下的空气作为绝缘介质的金属封闭开关设备称为 GIS (gas-insulated metal-enclosed switchgear), 它是由断路器、母线、隔离开关、电压互感器、电流互感器、避雷器、套管 7 种高压电器组合而成的高压配电装置。GIS 采用的是绝缘性能和灭弧性能优异的六氟化硫 (SF₆) 气体作为绝缘和灭弧介质, 并将所有的高压电器元件密封在接地金属筒中, 与传统敞开式配电装置相比, GIS 具有占地面积小、元件全部密封不受环境干扰、运行可靠性高、运行方便、检修周期长、维护工作量小、安装迅速、运行费用低、无电磁干扰等优点。经过 30 多年的研制开发, GIS 技术发展很快并迅速被应用于全世界范围内的电力系统。目前, 随着电力系统自身的发展以及对系统运行可靠性要求的日益提高, 必将新建更多的 GIS 变电站, GIS 设备将成为本世纪高压电器的发展主流。

目前在四川大部分地区 GIS 变电站的应用规模还不够大, GIS 设备的数量还不够多, 缺乏足够的运行经验。很多单位在 GIS 设备选型时, 由于没有相应的经验可以借鉴, 对设备的关键参数和接线形式无法做出很好的选择。这给 GIS 变电站的安全稳定运行带来了较大的隐患, 同时对今后的检修和维护造成了极大的不便。有时不得不牺牲局部电网系统的可靠性来进行单个间隔的扩建; 甚至因为地区电网重要性无法进行扩建或缺陷处理, 最终导致大面积停电。因此, 在 GIS 设备的选型阶段充分考虑运行中暴露的问题, 借鉴其他单位的经验教训, 对于今后 GIS 设备的运行维护起着至关重要的作用。

1 GIS设备选型应注意的几点问题

根据四川地区当前 GIS 设备的运行经验, 在新建 GIS 变电站选型时, 应特别注意以下几点问题。

1.1 GIS变电站内桥形接线主变压器高压侧应选用快速隔离开关

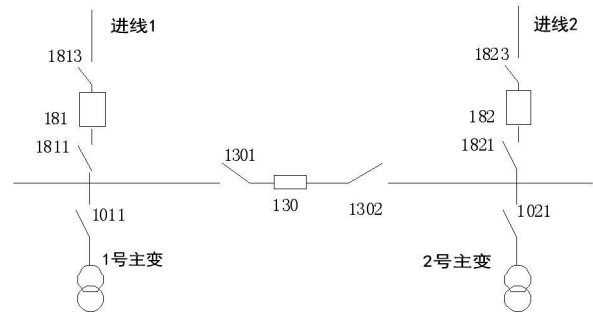


图 1 桥形接线主变压器高压侧

如图 1 所示, 全站由进线 2 主供的情况下, 若 1021 号刀闸采用的是普通的隔离开关, 无法断开空载变压器, 当 2 号变压器要进行检修或预试时, 就只能断开 110 kV 进线 182 号开关, 全站停电, 然后断开 1021 号刀闸主变压器停电, 再恢复 182 号开关对 1 号主变压器供电, 2 号主变压器才能进行检修。事实上, 由于遵守先断开负荷侧开关才能断开电源侧开关的操作顺序, 全站停电的时间将会很长。而城区采用 GIS 变电站的地方都是负荷非常密集、供电非常重要的地区, 可靠性要求非常高, 即使短时的停电也会造成巨大的影响。很多时候类似的检修工作都只能半夜施工, 而且还必须提前通知用户并做好充分准备, 以极短的时间完成工作; 2 号主变压器事故时, 对用

户的停电时间和恢复时间比较长,因为全站必须停两次。

如果 1021 号刀闸采用的是快速隔离开关,可以开断变压器的空载电流,当 2 号变压器要进行检修或预试时,可以直接断开变压器低压侧开关,然后拉开 1021 号刀闸对主变压器停电,完全不影响 1 号主变压器的供电,极大地缩短了 2 号主变压器的停电时间和对重要用户的影响。

由此可见,内桥形接线主变压器高压侧选用快速隔离开关将给今后的检修和维护带来很大的方便。

1.2 新建 GIS 变电站应考虑预留间隔扩建时母线不停电

新建 GIS 变电站时,出于节约投资的考虑,往往不是都按最终规模设计和建设。对于普通的变电站,由于扩建间隔的构架初期时已经建好,搭接母线的较短,因此母线停电容易安排;GIS 变电站则不同,由于母线对接后气室还需抽真空、充 SF_6 气体、静置、做耐压试验等,母线停电的时间很长,特别是 220 kV 双母线接线方式的 GIS 变电站,双母根本无法长期停电。

比如成都电业局的 220 kV 发展变电站,220 kV 系统采用双母线接线方式,由于初期扩建间隔未安装母线和隔离开关,扩建间隔时发展变电站的 10 kV 负荷做了大量的改接工作,110 kV 变电站的主供方式也做了大量的调整,给调度和运行人员增加了很大的负担和安全风险。

因此,运行单位必须在可研和初设审查时,要求将预留间隔的母线和隔离开关一次建成,确保新建 GIS 变电站在预留间隔扩建时母线不停电,要求厂家在预留间隔增加单独的扩建气室或其他方案,并在签定技术协议时要求厂家充分说明预留间隔的扩建方案及附图,以避免出现上述的不利情况。

1.3 接地开关、快速接地开关的接地端子应引出外壳之外并与外壳绝缘后再接地

GIS 的接地开关、快速接地开关的接地端子应引出外壳之外并与外壳绝缘后再接地,以便测量回路电阻,校验电流互感器变比,检测电缆故障,进行线路参数或电缆参数测试。

早期的产品接地端子三相在 GIS 内部直接连接再引出接地,接地开关导电杆与外壳不能绝缘分隔,只能先测量导体与外壳的并联电阻 R_0 和外壳的直流

电阻 R_1 (断开开关),然后按下式换算: $R = \frac{R_0 R_1}{R_1 - R_0}$ 。

而接地开关导电杆与外壳绝缘时,可临时解开接地连接线,利用回路上的两组接地开关导电杆关合到测量回路上直接进行测量,非常方便,也节省了测量时间。

在 GIS 变电站进行线路参数测试时,如图 2 示,若接地端子应引出外壳之外并与外壳绝缘,则可以在线路侧 6 号接地刀闸合上后,进行线路参数测试。否则,就要考虑合上 3 号刀闸和 4 号地刀进行测试,有时甚至需要将母线停电,合上母线接地刀闸进行线路参数测试,相当烦琐而且不易停电安排。

某变电站曾经发生过一起 GIS 变电站线路参数测试导致主变压器差动保护跳闸的不安全情况。在 110 kV 文指线线路参数测试工作时,由于 110 kV 某变电站的 18160 号地刀接地未引出,无法进行短接。根据现场实际情况,采取拉开 18160 号地刀、合上 1813 号刀闸和 18140 号地刀,在 18140 号地刀外引接地处进行短接的试验方案。查勘人员凭经验主观认为开关 TA 是安装在 181 号开关和 18140 号地刀之间,而不在 18140 号地刀和 1813 号刀闸之间,未进一步去落实 181 号开关 TA 具体位置,主观断定不会对保护造成影响,没将 181 号开关 TA 作为危险点进行分析和辨识。而实际上该站 181 号开关 TA 安装在 1813 号刀闸和 18140 号地刀之间,TA 已经进入了试验回路中,181 号开关 TA 在试验中有电流通过,从而导致了 1 号主变压器差动保护动作。所幸的是当时 1 号主变压器正在停运检修,才不致造成严重后果。

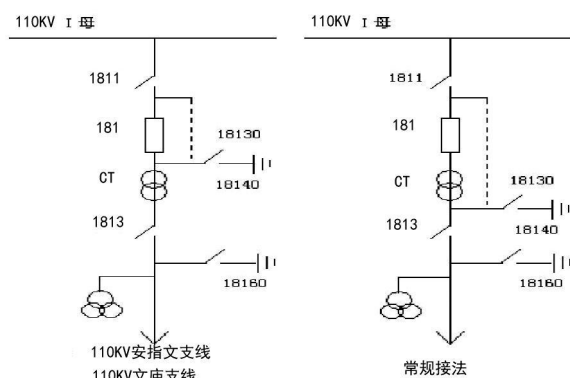


图 2 线路参数测试

因此,在标书和技术协议中应特别强调接地端子引出外壳之外并与外壳绝缘后接地。

1.4 SF_6 密度继电器和指示压力表应具有不拆卸即能实现现场校验的装置

根据电力设备预防性试验规程中关于 GIS 设备

(下转第 63 页)

了一定的成果,但要真正实现保护对系统运行方式和故障状态的自适应,必须获得更多的系统运行和故障信息,只有实现保护的计算机网络化,才能做到这一点。

4 结束语

中国电力系统继电保护技术的发展经历了 4 个阶段。随着电力系统的高速发展和计算机技术、通信技术的进步,继电保护技术面临着进一步发展的趋势。其发展将出现原理突破和应用革命,由数字时代

(上接第 55 页)
的要求,应按照周期对 SF₆ 气体密度监视器(包括整定值)进行预试。

国家电网公司 18 项电网重大反事故措施(试行)关于“预防 SF₆ 断路器及 GIS 故障的措施”明确规定:SF₆ 压力表和密度继电器应定期进行校验。

但大量的密度继电器由于没有专用的接头,必须拆卸后才能进行测试,仅仅为了预试在现场进行大量密度继电器的拆卸几乎是不可能的。另一方面,有些生产厂家密度继电器的接头是定型产品,他们不愿意改变定型设计,从而导致不能严格贯彻执行预试规程和反措的要求。

随着反措贯彻力度的加强,很多厂家也生产出了不拆卸即能实现现场校验的密度继电器。因此在标书和技术协议中应特别强调 SF₆ 密度继电器和指示压力表应具有不拆卸即能实现现场校验的装置,并在投运前认真验收。

有种不拆卸即能实现现场校验的装置类似于管道的三通接头,有两个阀门。当主阀门关闭后,打开侧阀门即可以很方便地用仪器校验密度继电器。校验完成后,关闭侧阀,打开主阀恢复正常运行状态。需要特别注意的是,试验完成后一定要开启主阀门,否则密度继电器的读数无法正确反映 GIS 气室的实际压力,若开关气室漏气未被发现,压力继续降低有可能造成开关无法灭弧发生爆炸的严重后果。

2 GIS 设备选型方面其他一些值得注意的问题

跨入信息化时代,发展到一个新的水平。这对继电保护工作者提出了艰巨的任务,也开辟了活动的广阔天地。

参考文献

[1] 王梅义. 电网继电保护应用 [M]. 北京:中国电力出版社, 1998.
[2] 李宏任. 实用继电保护 [M]. 北京:机械工业出版社, 2002.
[3] 杨奇逊. 微型机继电保护基础 [M]. 北京:水利电力出版社, 1988.

(收稿日期: 2009—01—11)

1) GIS 开关的短路开断电流应考虑适当的裕度。由于 GIS 设备的维护工作量小、在运时间长,选择短路开断容量应有充分的裕度,以免将来电网运行方式的改变造成 GIS 开关的短路开断电流小于实际安装点的最大短路电流,几年后又开始改造。

2) GIS 设备与主变压器的连接方式应考虑今后检修的方便。

3) GIS 设备的操动机构尽量选择可靠性高、维护方便的产品。

4) 应要求厂家使用符合质量要求的吸附剂,在使用过程中不掉灰。

5) 应要求厂家选用质量优良的二次端子(如菲尼克斯),将二次回路正负电源端子之间用空端子隔开。

6) 应要求厂家提供 SF₆ 气体的总重量和 SF₆ 气体水份与温度变化的关系曲线。

3 结 论

在 GIS 设备选型阶段认真做好分析比较工作,将会给今后设备的运行、检修和试验带来很大的好处。因此各单位应高度重视 GIS 设备类标书及技术协议的编制、审查工作。同时应注意加强 GIS 方面知识的学习和交流,不断收集、整理经验,加以改进和完善,从而更好地为电网服务。

作者简介:

张华强, (1973—), 工程师, 成都电业局生产技术部, 开关及主变设备专责。

(收稿日期: 2008—12—10)

自适应遗传—禁忌搜索混合算法在 PMU 最优配置中的应用

李新振, 滕 欢

(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘 要:针对 PMU 最优配置问题, 提出一种结合自适应遗传算法与禁忌搜索算法的混合算法。通过初始配置原则, 缩小了算法的寻优范围。充分利用两种算法各自的特点, 结合自适应遗传算法并行计算特性与禁忌搜索算法跳出局部最优解的能力, 使得该混合算法寻得全局最优解的同时, 提高了算法的优化效率, 增强了算法的鲁棒性。最后利用 IEEE 14、IEEE 39、IEEE 57 节点系统对该混合算法与其他两种遗传算法进行了对比验证。

关键词:同步相量测量单元 (PMU); 最优配置; 自适应遗传算法; 禁忌搜索算法; 自适应遗传—禁忌搜索混合算法

Abstract: A new hybrid algorithm integrated adaptive genetic algorithm with Tabu search is presented for solving the optimal PMU placement problem. It can minimize the searching scope by initial placement rules. By taking fully advantage of the characteristics of the two algorithms and combined the parallel computing feature of adaptive genetic algorithm and the capacity of avoiding local optimal solution of Tabu search algorithm, the optimization efficiency and robustness of the algorithm are improved simultaneously when the hybrid algorithm finds the optimal solution of the overall situation. The contrast and verification between the hybrid algorithm and the other two genetic algorithms are carried out by the numerical calculation of IEEE 14-bus, IEEE 39-bus and IEEE 57-bus system, respectively.

Key words: phasor measurement unit (PMU); placement optimization; improved adaptive genetic algorithm; Tabu search; hybrid adaptive genetic algorithm—Tabu search algorithm

中图分类号: TM711 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)03-0056-05

相量测量单元 PMU 在电力系统中的应用, 为电网实时监控和在线闭环控制提供了有效的手段。在电网的所有节点上都安装 PMU, 将大大改善电力系统的监控水平, 但由于目前 PMU 价格昂贵, 如何在保证电力系统可观测性的基础上, 安装最少数量的 PMU (OPP—optimal PMU placement) 成了国内外学者广泛关注的问题之一^[1~6]。

在哪些节点安装 PMU, 才能即保证测量系统可观又使 PMU 安装数量最少, 涉及到组合优化问题:

$$\begin{aligned} J &= \min \{K\} \\ x &\in S \\ \text{Subject to } Nu &= 0 \end{aligned}$$

其中 S 为解空间, K 为 PMU 安装的数量, Nu 为所有不可观测母线数。求解这类最优化问题主要有三种方法: 枚举法、启发式算法和搜索算法。枚举法不适用于空间规模较大的情况。启发式算法效率较高, 但针对不同的问题需要找出特定规则, 通用性不强。搜索算法使用某种规则随机搜索最优解, 在解的质量和效率上能取得好的平衡, 已广泛应用于优化计算

中。

在以系统状态完全可观测为目标的 PMU 配置研究方面, Bakwin 开创性的将修正的二分搜索法和模拟退火方法相结合的双搜索法用于此问题的求解^[4], 但模拟退火法中采用的配置模型和调整方法比较简单, 不适用于较大规模系统。禁忌搜索算法^[9, 10]通过禁忌列表来减少搜索空间, 加快搜索速度, 但该算法对初始解依赖性较强。遗传算法是基于“适者生存”的一种高度并行、随机和自适应的优化算法。文献 [5] 提出了一种改进的自适应遗传算法, 在算法中加入了进化参数衰减因子, 克服了遗传算法早熟的缺点, 但算法易陷入局部最优解, 且未充分利用系统拓扑结构, 解空间未作优化, 对大系统适应性不强。混合优化策略^[10]将不同的算法组合起来, 各取所长, 近年来得到广泛应用, 取得了理想的效果。

基于混合优化思想, 提出了一种结合禁忌搜索与自适应遗传算法的混合算法, 并利用初始配置原则, 在配置初期, 给出了必须配置 PMU 节点和无需配置 PMU 的节点。在进化过程中, 保留了精英个体, 这些

个体被直接复制到下一代。禁忌搜索算法随机选取一定数量的当前个体,利用领域解产生规则生成当前个体的若干领域个体,并利用禁忌列表和藐视准则选择合适的个体繁殖到下一代,在避免遗传算法陷入局部最优解的同时加快了遗传算法的鲁棒性。自适应遗传一禁忌搜索混合算法具有的较好的有效性和通用性,在 IEEE 14 节点系统、IEEE 39 节点系统、IEEE 57 节点系统的优化配置计算中取得了满意的效果。

1 电力系统可观测性分析理论

1.1 系统可观测性分析理论

在电力系统中,电压相量可测或可求出的节点称为可观测节点,否则为不可观测节点,若系统的所有节点均为可观测节点,则系统为完全可观测系统;反之,为不可观测系统。电力系统的可观测性可以从两个角度来分析,即:代数可观测和拓扑可观测。

1.1.1 代数可观测

对于一个 N 个节点 m 个量测量的电力系统,可以用下面的线性化量测方程来描述:

$$z = Hx + v$$

其中: z 为 m 维量测相量; H 为 $m \times (2N-1)$ 维量测雅克比矩阵; x 为 $2N-1$ 维电压状态相量; v 为 m 维量测噪声相量。

如果量测雅克比矩阵 H 是满秩和良态的,即满足 $\text{Rank}(H) = 2N-1$,则这个系统是代数可观测的。

1.1.2 拓扑可观测

从图论的角度,可以将电力系统看作是一个由 N 个顶点 b 条边构成的图 $G=(V, E)$, V 表示图的顶点集合, E 表示图的边集合,它们分别对应于系统的母线与支路集合。测量网络构成了一个测量子图 $G'=(V', E')$, 并有 V' 包含于 V , E' 包含于 E 。如果测量子图 G' 与图 G 的关系满足 V' 包含于 V , 即子图 G' 包含了图 G 的所有顶点,则系统是拓扑可观测的。值得指出的是:代数可观测性意味着拓扑可观测性,反之不然。

1.2 系统可观测性判断原则

由 Ohm 定律和 Kirchhoff 定律,可得出如下节点可观测性的判定原则:

- 1) 已知支路一端节点电压和支路电流,则支路另一端节点电压被虚拟测量(图 1A)。
- 2) 已知支路两端的节点电压,则支路电流被虚

拟测量(图 1B)。

3) 节点除一条支路外,其余支路电流都已知,则未知电流支路的电流被虚拟测量(图 1C)。

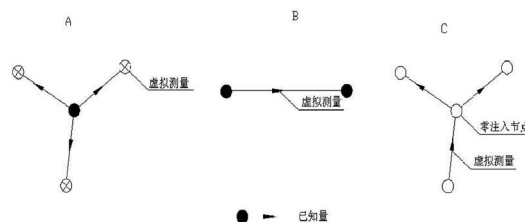


图 1 虚拟量测量分类

1.3 系统可观测性分析方法

根据系统网络邻接矩阵所确定的节点之间的连通关系,从安装 PMU 的节点开始,通过测量或虚拟测量的电流支路,扩张到虚拟测量的电压节点,然后从观测性未知的节点开始(按节点编号由小到大扫描),反复利用 1.2 节的可观测判定三原则,扫描生成虚拟测量,直到无新增虚拟测量为止,在扫描完成后会生成一个测量矩阵。若矩阵包含了所有系统节点,则整个系统就是拓扑可观的。若某些系统节点没有包含在测量矩阵中,则系统不完全可观。

2 自适应遗传一禁忌搜索混合算法

2.1 算法总览

PMU 最优配置问题实际是组合优化问题, GA、TS 是解决组合优化问题的有效手段,各有所长。针对 PMU 最优配置问题,充分利用遗传算法和禁忌搜索算法各自的特点,提出了自适应遗传一禁忌搜索混合算法。

图 2 为算法流程图。算法的主要步骤简述如下。

- 1) 根据初始配置原则,分析系统节点关联矩阵,确定必须安装 PMU 和不必安装 PMU 的节点集合 S_{pm} , S_{p0} 。
- 2) 初始化自适应遗传一禁忌搜索混合算法的参数,将剩下的 k_{other} 个节点编码,随机生成 m 个初始解,并利用解修复原则修复不可行解。
- 3) 执行遗传算法的交叉、变异操作。
- 4) 在当前种群中,随机选取一定数量的个体,将禁忌搜索算法产生的 k_s 个新个体加入到当前种群中。
- 5) 精英保留策略保留当前种群中的优良个体,利用无回放余数选择方法选择除优良个体外的其他个体,产生新的种群。

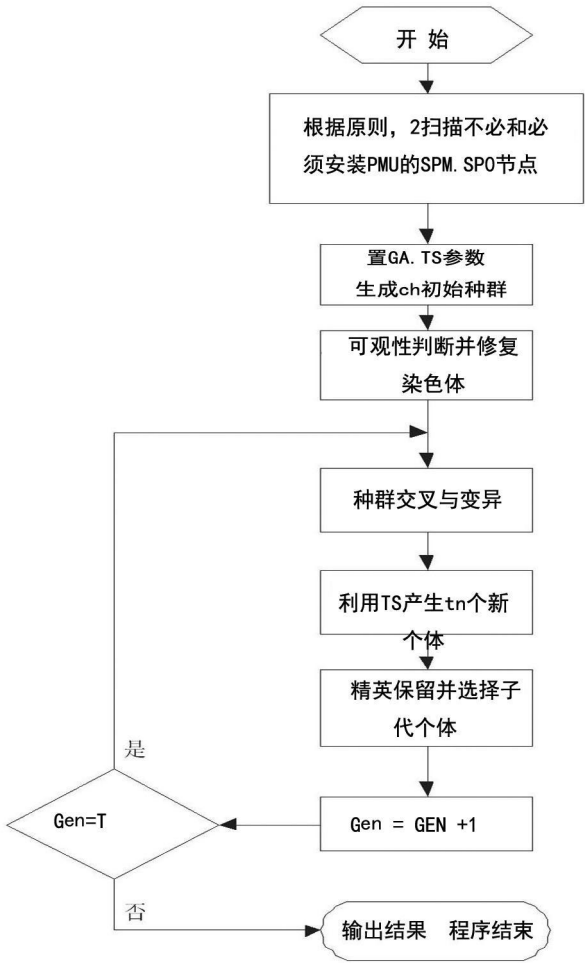


图 2 IAGA-TS混合算法流程图

2.2 改进的自适应遗传算法

标准遗传算法对交叉与变异概率的取值一般是凭经验和反复试验来确定, 而且是针对不同的问题取不同的值, 数值通常也是固定的。为此, Srinivas提出了一种自适应遗传算法 AGA (Adaptive GA) [7], 其交叉概率与变异概率会随着个体适应度变化而自动调整。自适应遗传算法在一定程度上改善了标准遗传算法因参数选取不当而引起的早熟现象。但此方法对于群体处于进化后期相对有利, 而对进化初期存在一定的不利影响, 算法容易陷入局部最优。

针对 Srinivas提出的自适应遗传算法的不足, 文献 [5]、[8]提出了改进的自适应遗传算法, 算法可同时根据个体的适应度与进化时间的变换自动调整交叉与变异概率, 使得进化初期保持较高的交叉与变异概率, 能抑制算法早熟, 并有利于新个体的产生。在进化晚期, 个体的交叉与变异概率在衰减因子作用下迅速减小, 从而可以有效保护最优解不被破坏。文献 [5]中的算法未充分利用电力系统的网络拓扑信息,

N个节点均参加染色体编码, 初始解空间较大, 算法收敛较慢, 不适用于较大的系统。

针对文献 [5]、[8]提出的自适应遗传算法的不足, 为了有效的减少解的搜索空间, 针对 PMU最优配置这一实际问题, 利用初始配置原则, 将电力系统节点划分为必须配置 PMU的节点、不需配置 PMU的节点 k_{no} 和其它未配置 PMU的节点 k_{other} , 初始配置原则如下:

- 1) 邻接节点数为 1 的节点及邻接节点数为 2 的零注入节点无需配置 PMU [6]。
- 2) 若某节点与邻接节点数为 1 的节点相邻, 且该节点为负荷或发电机节点, 则该节点需要预先配置 PMU [6]。

这样以来, 染色体长度由 N 缩减为 K_{other} , 有效地减少了解的搜索空间, 加快了算法的收敛速度。值得指出的是, 仿真结果表明文献 [7]中预处理原则 3 并不适用, 如 IEEE 57 节点系统仿真中, 节点 10、49 为 2T 节点的相邻节点, 节点 53 为 3T 节点的中间节点, 按文献 [6]的原则 3 需安装 PMU, 这样需要 15 台 PMU, 而实际只需 12 台便可使系统可观测。

2.2.1 染色体编码

染色体采用二进制编码, 染色体长度等于 k_{other} , 每个基因位值由下式确定:

$$X_i = \begin{cases} 1, & \text{节点 } i \text{ 安装了 PMU} \\ 0, & \text{节点 } i \text{ 未安装 PMU} \end{cases}$$

其中: $i=1, \dots, k_{other}$

2.2.2 适应度函数

适应度函数如下式所示:

$$f = C_{max} - C_1 \cdot \sum_{i=1}^{k_{other}} X_i$$

其中: C_{max} 为一个较大的数以保证适应度函数值大于 0, C_1 为比例系数。取 $C_{max} = N$, 即节点数; $C_1 = 1$ 。

2.2.3 遗传操作

遗传操作主要包括选择、交叉与变异等运算过程。选择运算将适应度高的个体以较大机率复制到下一代, 而淘汰适应度低的个体。选择算子有很多种, 如 Roulette 轮盘赌法、排序法、随机联赛法、无回放余数随机选择等 [10]。采用无回放余数随机选择, 这种选择操作方法可确保适应度比平均适应度大的一些个体一定能被遗传到下一代群体, 选择误差比较小, 同时算法保留精英个体, 将精英个体直接复制到

下一代群体。仿真结果表明文献 [5] 的 P_c 、 P_m 计算算法较文献 [8] 优, 故采用文献 [5] 中 P_c 、 P_m 的计算算法。 P_c 、 P_m 计算公式如下式所示:

$$P_c = \begin{cases} F(t) \cdot [k_0 + (k_1 + k_0) \cdot \frac{f_{\max} - f}{f_{\max} - f_{\text{avg}}}], & f \geq f_{\text{avg}} \\ K_1, & f < f_{\text{avg}} \end{cases}$$
$$P_m = \begin{cases} F(t) \cdot [k_2 + (k_3 - k_2) \cdot \frac{f_{\max} - f}{f_{\max} - f_{\text{avg}}}], & f \geq f_{\text{avg}} \\ K_3, & f < f_{\text{avg}} \end{cases}$$

其中 $F(t) = \lambda e^{-\beta(t/T)^\alpha}$, 参数取值为: $k_0 = 0.5$, $k_1 = 1$, $k_2 = 0.5$, $k_3 = 1$, $\alpha = 5$, $\beta = 30$, $\lambda = 1$ 。

2.2.4 不可行解修复机制

遗传算法的交叉、变异运算可能破坏原本满足系统可观性限制条件的解, 故遗传运算作用后的解需要引入修复机制, 具体为: 首先从不可观节点中选择出线数最大的节点, 为其安装 1 台 PMU, 即将该节点对应的染色体基因位置“1”; 然后再判断染色体是否满足约束条件, 如果不满足则重复上述过程, 直到约束条件得到满足为止。经过这个修复过程, 问题的解就被严格限定在了满足约束条件的可行解空间内。

2.3 禁忌搜索算法

禁忌搜索 (Tabu Search, 简称 TS) 算法是对局部领域搜索的一种扩展, 是一种全局逐步寻优算法, 是对人类智力过程的一种模拟。TS 算法通过引入一个灵活的存储结构和相应的禁忌准则来避免迂回搜索, 并通过藐视准则来激活一些被禁忌的优良状态, 进而保证多样化的有效搜索以最终实现全局优化。

文中禁忌搜索算法相关方面详述如下。

2.3.1 领域解产生规则

兼顾算法收敛速度和全局解搜寻能力, 即禁忌算法作用强度, 只随机选取当前群体 10% ~ 15% 的个体。由于是搜寻 PMU 最小配置个数, 所以针对当前选中个体, 随机选取 1~2 个安装了 PMU 的节点, 也就是染色体编码为“1”的节点, 将其置为零 (必要时需修复机制修复), 太多的变换将使算法退化为随机搜索算法。

2.3.2 禁忌列表

禁忌列表长度是禁忌搜索算法的主要参数之一, 权衡参考文献 [9] 和仿真实验结果, 这里取禁忌列表长度为 6。

2.3.3 藐视准则

采用 “Best So far” 准则, 即选取目前适应度最高

的个体, 保证算法全局解搜寻能力。

3 算例分析

应用在 Matlab 7.1 软件下开发的 IAGA-TS 混合算法、PMU 量测网络可观性分析及 OPP 优化程序, 分别对 IEEE 14、39、57 节点算例进行了验证, 并对比了文献 [5] 中的自适应遗传算法, 加入初始配置原则的自适应遗传算法和文中的算法。

3.1 IEEE 14、39、57 节点系统 PMU 配置仿真

3.1.1 IEEE 14 节点系统

按照预处理原则, 节点 8 不需要配置 PMU, 染色体长度为 13, 计算结果为, 在 2、6、9 三个节点安装 PMU 装置即可使全系统完全可观测。

3.1.2 IEEE 39 节点系统

按照预处理原则, 节点 1、9、30、31、32、33、34、35、36、37、38 不需要配置 PMU, 节点 20、23、25、29 需要配置 PMU, 染色体长度为 24, 计算结果为, 在 3、8、12、16、20、23、25、29 八个节点安装 PMU 装置即可使全系统完全可观测。

3.1.3 IEEE 57 节点系统

按照预处理原则, 节点 21、26、33、34、39、40、45、46 不需要配置 PMU, 节点 32 需要配置 PMU, 染色体长度为 48, 计算结果为, 在 1、6、13、19、27、30、32、38、51、52、54、56 十二个节点安装 PMU 装置即可使全系统完全可观测。

3.2 算法分析对比

提出的 IAGA-TS 混合算法与文献 [5] 中的 IAGA 算法及加入初始配置原则的 IAGA 算法在 OPP 问题中的应用仿真结果对比如图 3~图 5 所示。其中 IAGA1 为文献 [5] 的算法, IAGA2 为加入初始配置原则的 IAGA 算法, IAGA-TS 为本文提出的算法, 图表横坐标为进化代数, 纵坐标为各代寻得的最小 PMU 配置数。从图中可以看出, 提出的 IAGA-TS 混合算法在收敛速度及全局最优解搜寻上均优于前述的两种算法。IAGA-TS 混合算法在 IEEE 14、39、57 节点系统的 OPP 问题仿真取得了较满意的效果。

4 结 论

随着 PMU 在电力系统中的广泛应用, 如何以最少的数量配置 PMU 使得电力系统状态可观测已成为

一个十分重要的课题。提出了一种自适应遗传—禁忌搜索 (IAGA—TS)混合算法,算法改进了文献 [5] 提出的 IAGA 算法,缩小了解搜索空间,加快算法寻优速度及鲁棒性,形成了一种快速、准确的 OPP 问题解决方法,算例仿真结果证明了该方法的有效性。

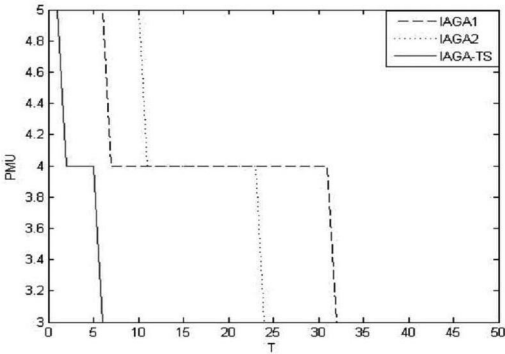


图 3 IEEE 14 节点系统仿真结果对比

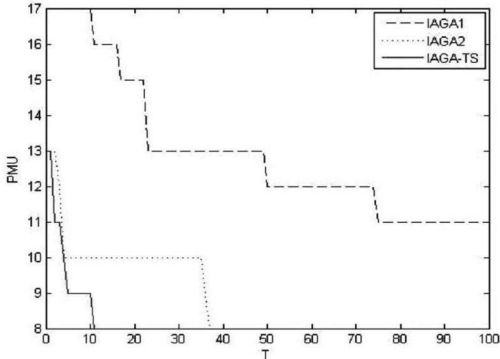


图 4 IEEE 39 节点系统仿真结果对比

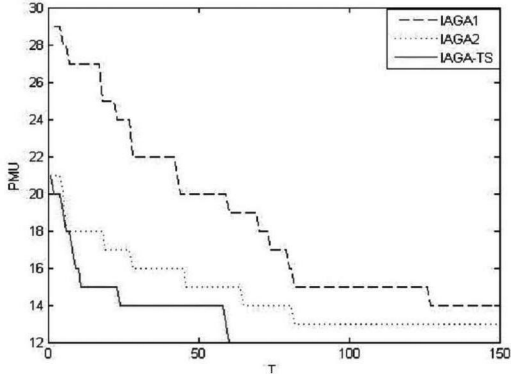


图 5 IEEE 57 节点系统仿真结果对比

参考文献

[1] 许树楷,谢小荣,辛耀中.基于同步相量测量技术的广域测量系统应用现状及发展前景 [J]. 电网技术, 2005, 29 (2): 44—49.

[2] Marin F J Garcia—Lagos F, Joya G, et al Genetic algorithms for optimal placement of phasor measurement units in electrical networks [J]. IEEE electronics Letters 2003, 39(19): 1403—1405.

[3] Nuqiu R F, Phadke A G. Phasor measurement unit placement techniques for complete and incomplete observability [J]. IEEE Trans on Power Delivery 2005, 20 (4): 2381—2388.

[4] Baklwin T L, Mili L, Boisen M B, et al Power system observability with minimal phasor measurement placement [J]. IEEE Trans on Power Systems 1993, 8 (2): 707—715.

[5] 沙明智,郝育黔,郝玉山,等.电力系统 PMU 安装地点选择优化算法的研究 [J]. 继电器, 2005, 33(7): 31—37.

[6] 李强,于尔铿,吕世超,等.一种改进的相量测量装置最优配置方法 [J]. 电网技术, 2005, 29(12): 57—61.

[7] Srinivas M, Patnaik IM. Adaptive Probabilities of Crossover and Mutation in Genetic Algorithms [J]. IEEE Trans on Systems Man and Cybematics 1994, 24 (4): 656—667.

[8] 王小平,曹立明.遗传算法——理论、应用与软件实现 [M]. 西安交通大学出版社, 2000.

[9] A. H. Mantawy, Youssef L, Abdel—Magid, Shokri Z, Selin. Integrating Genetic Algorithms Tabu Search and Simulated Annealing for the unit commitment problem // IEEE Trans on Power Systems 1999, 14 (3): 829—836.

[10] 王凌.智能优化算法及其应用 [M]. 清华大学出版社, 2001.

作者简介:

李新振 (1982—),男,硕士研究生,研究方向为电力系统调度及其自动化。

滕欢 (1965—),女,高级工程师,长期从事电力系统调度自动化科研、教学及工程实践工作。

(收稿日期: 2008—12—15)

(上接第 43 页)

单相电路谐波检测方法,通过预设正余弦信号的基频和初相角,不要锁相环就能准确地检测出谐波和无功电流。该方法算法简单,硬件电路容易实现。

参考文献

[1] 王兆安,杨君,刘进军.谐波抑制和无功补偿 [M]. 北

京:机械工业出版社, 1998: 209—238.

[2] 张厥盛,郑继禹,万心平.锁相技术 [M]. 西安电子科技大学出版社, 1994: 1—18.

(收稿日期: 2008—12—26)

电力系统微机保护技术前瞻

刘 柳

(映秀湾水力发电总厂, 四川 都江堰 611830)

摘 要:概述微机继电保护技术的成就, 结合典型案例分析当前微机保护存在的不足。展望未来微机保护技术的发展方向和前景。

关键词:继电保护; 运行现状; 发展前景

Abstract: The achievements of computer-based relay protection technology are summarized, the defects are analyzed according to some typical cases, and the development direction and future of computer-based relay protection technology are previewed.

Key words: relay protection; present situation; development future

中图分类号: TM77 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)03-0061-03

1 微机继电保护的主要特点

当前微机保护充分利用了计算机技术上的两个显著优势: 高速的运算能力和完备的存贮记忆能力, 以及采用大规模集成电路和成熟的数据采集、A/D 模数变换、数字滤波和抗干扰措施等技术, 使其在速动性、可靠性方面均优于以往传统的常规保护, 而显示了强大生命力, 与传统的继电保护相比, 微机保护有许多优点, 其主要特点如下。

1) 改善和提高继电保护的動作特征和性能, 正确動作率高。主要表现在能得到常规保护不易获得的特性; 其很强的记忆力能更好地实现故障分量保护; 可引进自动控制、新的数学理论和技术, 如自适应、状态预测、模糊控制及人工神经网络等, 其运行正确率很高, 已在运行实践中得到证明。

2) 可以方便地扩充其他辅助功能。如故障录波、波形分析等, 可以方便地附加低频减载、自动重合闸、故障录波、故障测距等功能。

3) 工艺结构条件优越。体现在硬件比较通用, 制造容易统一标准; 装置体积小, 减少了盘位数量; 功耗低。

4) 可靠性容易提高。体现在数字元件的特性不易受温度变化、电源波动、使用年限的影响, 不易受元件更换的影响; 且自检和巡检能力强, 可用软件方法检测主要元件、部件的工况以及功能软件本身。

5) 使用灵活方便, 人机界面越来越友好。其维护调试也更方便, 从而缩短维修时间; 同时依据运行经验, 在现场可通过软件方法改变特性、结构。

6) 可以进行远方监控。微机保护装置具有串行通信功能, 与变电所微机监控系统的通信联络使微机保护具有远方监控特性。

微机保护虽有许多优点, 但在发展过程中也存在一些不足, 需要完善。

2 案例分析

2007 年 9 月 1 日 22:30 分左右, 某电站出线开关 202DL 误跳闸, 动作信号有: 1 号线路保护动作复归; 2 号线路保护 TA、TB、TC 灯亮; 2 号主变负序过流 T1 灯亮; 4F 机组保护负序过流 1XJ、2XJ 灯亮。经检查发现: 4F 负序过流定值 I II 段时限为 0 s 是造成误跳闸的主要原因。在事故中 4F 负序过流插件损坏。分析原因为: 该电厂保护班当年 1 月对电站 4F 机组保护装置进行了常规的年检调试工作, 调试人员在保护装置校检完成后, 在工控机上对照打印的校验前的定值进行定值修改, 在固化定值时, 由于工控机与 4F 保护装置之间通讯出现故障, 导致数据未传输到芯片上, 但 4F 机组保护上的定值并未被写入, 工控机上未显示任何异常信号, 因此调试人员认为定值已修改成功, 校验后的定值是工控机上的定值; 在 4F 保护装置运行一段时间以后, 工控机与 4F 保护装置之间通讯

恢复正常, 4F 机组保护数据回读给工控机, 刷新了工控机原有数据, 造成电站 4F 保护负序过流、复合过流时间整定值变为 0 s。从这一事故看出, 在工控机与保护装置之间通讯出现故障时, 工控机上不显示任何异常信号, 不能引起运行人员的注意, 这是造成事故的主要原因; 从技术上来说, 工控机应具有定值显示功能, 或者可以直接在保护装置上修改定值, 就不会产生上述出现的事情了。

3 未来微机保护技术前瞻

微机保护经过近 20 年的应用、研究和发展, 已经在电力系统中取得了巨大的成功, 并积累了丰富的运行经验, 大大提高了电力系统运行管理水平。近年来, 随着计算机技术的飞速发展以及计算机在电力系统继电保护领域中的普遍应用, 新的控制原理和方法被不断应用于计算机继电保护中, 以期取得更好的效果, 从而使微机继电保护的研究向更高的层次发展, 其未来趋势向计算机化、网络化、智能化、保护、控制、测量和数据通信一体化发展。

1) 微计算机硬件的更新和网络化发展在计算机领域, 发展速度最快的当属计算机硬件, 微处理机的发展主要体现在单片化及相关功能的极大增强, 片内硬件资源得到很大扩充, 单片机与 DSP 芯片二者技术上的融合, 运算能力的显著提高以及嵌入式网络通信芯片的出现及应用等方面。这些发展使硬件设计更加方便, 高性价比使冗余设计成为可能, 为实现灵活化、高可靠性和模块化的通用软硬件平台创造了条件。硬件技术的不断更新, 使微机保护对技术升级的开放性有了迫切要求。特别是现场总线的发展及其在实时控制系统中的成功应用充分说明, 网络是模块化分布式系统中相互联系和通信的理想方式。如基于网络技术的集中式微机保护, 大量的传统导线将被光纤取代, 传统的繁琐调试维护工作将转变为检查网络通信是否正常, 这是继电保护发展的必然趋势。微机保护设计网络化, 将为继电保护的设计和发展带来一种全新的理念和创新, 它会大大简化硬件设计、增强硬件的可靠性, 使装置真正具有了局部或整体升级的可能。

继电保护的作用不只限于切除故障元件和限制事故影响范围 (这是首要任务), 还要保证全系统的安全稳定运行。这就要求每个保护单元都能共享全

系统的运行和故障信息的数据, 各个保护单元与重合闸装置在分析这些信息和数据的基础上协调动作, 实现微机保护装置的网络化。这样, 继电保护装置能够得到的系统故障信息愈多, 对故障性质、故障位置的判断和故障距离的检测愈准确, 大大提高保护性能和可靠性。

2) 20 世纪 90 年代以来, 人工智能技术如神经网络、遗传算法、进化规划、模糊逻辑等在电力系统各个领域都得到了应用, 专家系统、人工神经网络 (ANN) 和模糊控制理论逐步应用于电力系统继电保护中, 为继电保护的发展注入了活力。

人工神经网络 (ANN) 具有分布式存储信息、并行处理、自组织、自学习等特点, 其应用研究发展十分迅速, 目前主要集中在人工智能、信息处理、自动控制和非线性优化等问题。近年来, 电力系统继电保护领域内出现了用人工神经网络 (ANN) 来实现故障类型的判别、故障距离的测定、方向保护、主设备保护等。例如在输电线两侧系统电势角度摆开情况下发生经过渡电阻的短路就是一非线性问题, 距离保护很难正确作出故障位置的判别, 从而造成误动或拒动; 如果用神经网络方法, 经过大量故障样本的训练, 只要样本集中考虑了各种情况, 则在发生任何故障时都可正确判别。其它如遗传算法、进化规划等也都有其独特的求解复杂问题的能力。将这些人工智能方法适当结合可使求解速度更快。可以预见, 人工智能技术在继电保护领域必会得到应用, 以解决用常规方法难以解决的问题。

3) 自适应控制技术在继电保护中的应用自适应继电保护的概念始于 20 世纪 80 年代, 它可定义为能根据电力系统运行方式和故障状态的变化而实时改变保护性能、特性或定值的新型继电保护。自适应继电保护的基本思想是使保护能尽可能地适应电力系统的各种变化, 进一步改善保护的性能。这种新型保护原理的出现引起了人们的极大关注和兴趣, 是微机保护具有生命力和不断发展的重要内容。自适应继电保护具有改善系统的响应、增强可靠性和提高经济效益等优点, 在输电线路的距离保护、变压器保护、发电机保护、自动重合闸等领域内有着广泛的应用前景。针对电力系统频率变化的影响、单相接地短路时过渡电阻的影响、电力系统振荡的影响以及故障发展问题, 采用自适应控制技术, 从而提高保护的性能。对自适应保护原理的研究已经过很长的时间, 也取得

了一定的成果,但要真正实现保护对系统运行方式和故障状态的自适应,必须获得更多的系统运行和故障信息,只有实现保护的计算机网络化,才能做到这一点。

4 结束语

中国电力系统继电保护技术的发展经历了 4 个阶段。随着电力系统的高速发展和计算机技术、通信技术的进步,继电保护技术面临着进一步发展的趋势。其发展将出现原理突破和应用革命,由数字时代

(上接第 55 页)
的要求,应按照周期对 SF₆ 气体密度监视器(包括整定值)进行预试。

国家电网公司 18 项电网重大反事故措施(试行)关于“预防 SF₆ 断路器及 GIS 故障的措施”明确规定:SF₆ 压力表和密度继电器应定期进行校验。

但大量的密度继电器由于没有专用的接头,必须拆卸后才能进行测试,仅仅为了预试在现场进行大量密度继电器的拆卸几乎是不可能的。另一方面,有些生产厂家密度继电器的接头是定型产品,他们不愿意改变定型设计,从而导致不能严格贯彻执行预试规程和反措的要求。

随着反措贯彻力度的加强,很多厂家也生产出了不拆卸即能实现现场校验的密度继电器。因此在标书和技术协议中应特别强调 SF₆ 密度继电器和指示压力表应具有不拆卸即能实现现场校验的装置,并在投运前认真验收。

有种不拆卸即能实现现场校验的装置类似于管道的三通接头,有两个阀门。当主阀门关闭后,打开侧阀门即可以很方便地用仪器校验密度继电器。校验完成后,关闭侧阀,打开主阀恢复正常运行状态。需要特别注意的是,试验完成后一定要开启主阀门,否则密度继电器的读数无法正确反映 GIS 气室的实际压力,若开关气室漏气未被发现,压力继续降低有可能造成开关无法灭弧发生爆炸的严重后果。

2 GIS 设备选型方面其他一些值得注意的问题

跨入信息化时代,发展到一个新的水平。这对继电保护工作者提出了艰巨的任务,也开辟了活动的广阔天地。

参考文献

[1] 王梅义. 电网继电保护应用 [M]. 北京:中国电力出版社, 1998.
[2] 李宏任. 实用继电保护 [M]. 北京:机械工业出版社, 2002.
[3] 杨奇逊. 微型机继电保护基础 [M]. 北京:水利电力出版社, 1988.

(收稿日期: 2009—01—11)

1) GIS 开关的短路开断电流应考虑适当的裕度。由于 GIS 设备的维护工作量小、在运时间长,选择短路开断容量应有充分的裕度,以免将来电网运行方式的改变造成 GIS 开关的短路开断电流小于实际安装点的最大短路电流,几年后又开始改造。

2) GIS 设备与主变压器的连接方式应考虑今后检修的方便。

3) GIS 设备的操动机构尽量选择可靠性高、维护方便的产品。

4) 应要求厂家使用符合质量要求的吸附剂,在使用过程中不掉灰。

5) 应要求厂家选用质量优良的二次端子(如菲尼克斯),将二次回路正负电源端子之间用空端子隔开。

6) 应要求厂家提供 SF₆ 气体的总重量和 SF₆ 气体水份与温度变化的关系曲线。

3 结 论

在 GIS 设备选型阶段认真做好分析比较工作,将会给今后设备的运行、检修和试验带来很大的好处。因此各单位应高度重视 GIS 设备类标书及技术协议的编制、审查工作。同时应注意加强 GIS 方面知识的学习和交流,不断收集、整理经验,加以改进和完善,从而更好地为电网服务。

作者简介:

张华强, (1973—), 工程师, 成都电业局生产技术部, 开关及主变设备专责。

(收稿日期: 2008—12—10)

微机备自投装置应用中的一些问题分析

唐利兵

(内江电业局, 四川 内江 641003)

摘 要:结合内江局 110 kV 变电站备用电源自动投入装置的应用现状, 主要针对实际应用较为广泛的 NSA—3152A、NSA—3151 型微机式备用电源自动投入装置在现场应用中遇到的问题, 进行了分析与探讨。

关键词:备用电源; 自动投入; 分析

Abstract: According to the current situation of reserve power supply automatic connection device used in 110 kV substations of Neijiang Electric Bureau, the analyses and discussions are done mainly about the problems occurring in the applying process of NSA—3152A, NSA—3151 series computer-based reserve power supply automatic connection devices which are widely used in this area.

Key words: reserve power supply; automatic connection; analysis

中图分类号: TM762 **文献标识码:** B **文章编号:** 1003—6954(2009)03—0064—04

近年来, 内江电网发展迅速, 电力网络系统也日益复杂。随着电网规模的不断扩大, 电气设备也采用了大量的新技术、新产品, 尤其继电保护及安全自动装置方面。由于继电保护和安全自动装置尚未形成完善、成熟的典型配合方式, 因此在现场应用中, 它们的相互配合问题很值得分析与探讨。

内江电网中, 110 kV 及以下电压等级的供电系统, 多采用环形设计单路供电的方式来保证其安全稳定运行, 而通常采用备用电源自动投入装置来提高系统的供电可靠性。这几年, 内江片区 110 kV 变电站综合自动化改造中, 备自投装置多采用南京电研电力自动化有限公司生产的 NSA—3152A、NSA3151 型微机备用电源自投装置。现主要就备用电源自动投入装置在现场应用中遇到的问题, 进行分析与探讨。

1 进线开关自投装置的应用

图 1 为 110 kV 进线开关自投主接线示意图。110 kV 进线备自投可分为进线 1 明备用和进线 2 明备用两种逻辑, 其动作逻辑为 (以方式 1: 1 号进线运行, 2 号进线备用为例): 当 1 号进线电源因故障或其它原因被断开后, 110 kV 母线失压, 备自投装置动作, 首先跳开 1 号开关 1DL 确认 1DL 跳开后, 合上 2

号进线开关 2DL 继续供电。

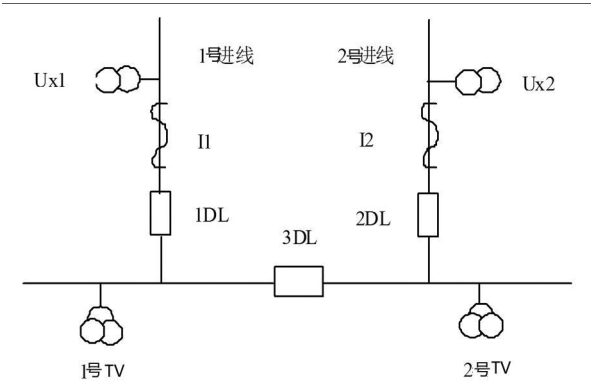


图 1 进线自投示意图

110 kV 进线备自投充电条件 (方式 1): I 母、II 母均三相有压, 当 2 号线路电压检查控制字投入时, 2 号线路有压; 1DL 和 3DL 在合位 (1DL 和 3DL 均有合后开入而无跳位开入), 2DL 在分位; 无外部闭锁开入信号。110 kV 进线备自投放电条件 (方式 1): 当 2 号线路电压检查控制器投入时, 2 号线路无压 (U_{x2}); 2DL 合上; 手跳 1DL 或 3DL; 其它外部闭锁信号; 整定控制字不允许 2 号进线开关自投。

110 kV 线路备自投装置需接入的电气量: 模拟量: 两段母线电压, 用于有压、无压判别; 两段进线电压, 作为自投准备及动作的辅助判据; 两段进线的单相电流, 是为了防止 TV 断线后造成误动, 也是为了更好的确认进线开关已跳开。开关量: 1DL、2DL、3DL 开关跳开位置开触点 (TWJ), 作为系统运行方式

判别, 自投准备及选择自投方式; 1DL、2DL、3DL 开关的合后位置信号, 作为手跳情况下备自投的闭锁; 闭锁方式 1 自投, 闭锁方式 2 自投、闭锁方式 3、4 自投三个输入 (其中方式 3、4 是指桥开关自投)。

110 kV 电源进线备自投装置, 控制的是变电站的主供电电源开关, 其动作行为的正确与否直接关系着整个变电站的供电可持续性和系统的稳定运行。为了更好的应用备自投装置, 保证系统供电可靠性, 现就 110 kV 进线备自投装置在现场应用中出现的几个问题, 分别分析如下。

1.1 HHJ 触点的引取

现在 110 kV 系统的变电站均按综合自动化的要求实行了无人值守, 站内控制屏也已取消, 站内开关的简单操作一般采用远方遥控方式。因此备自投装置所需合后触点 HHJ 已无法取自控制屏上的控制把手, 只能从保护装置操作回路中或采取必要的改进措施, 来提供备自投所需的合后 HHJ 备用空触点。

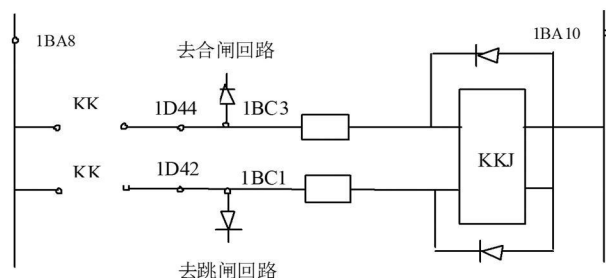


图 2 LFP941 系列保护手动操作回路简图

内江电业局 110 kV 变电站 110 kV 线路保护一般使用南瑞公司生产的 LFP-941 系列。图 2 所示为 LFP941 系列保护手动操作回路简图。图中 KKJ 为磁保持继电器, 合闸时该继电器动作并磁保持, 仅手跳该继电器才复归, 保护动作或开关偷跳该继电器不复归。因此, 其输出触点为合后 KK 位置触点, 也就是备自投所要求的 HHJ 触点。从 LFP941 保护操作回路图中, 可发现 LFP941 保护装置所直接提供的 KKJ 触点已用于重合闸的充放电, 并未直接提供其它的 KKJ 备用触点。但是查阅 LFP941 保护装置的电焊图, 就能发现其操作板上有一个备用 KKJ 触点, 只是未从印刷板上引出。当然, 重新引线, 肯定可以利用该触点, 但是仔细观察电焊图, 此触点情况如图 3 所示。如直接将图中的 5 与 5' 焊接在一起, 就可直接利用原先的 HWJ 触点的引出线。虽然现在的 KKJ 触点实际是和 HWJ 触点并在了一起, 但这并不影响备自投动作逻辑所要求的条件。

并且很方便的就获得了反映线路开关合后位置的 HHJ 触点。

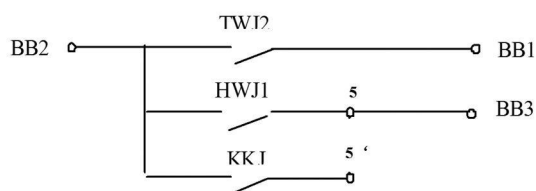


图 3 LFP941 接点联系图

1.2 备自投装置跳闸线接入的问题

按《继电保护和安全自动装置技术规程》要求, 备自投装置应符合下列要求: ①应保证在工作电源或设备断开后, 才投入备用电源或设备; ②工作电源或设备上的电压, 不论因任何原因消失时, 自动投入装置均应动作; ③自动投入装置应保证只动作一次。

因此, 在工作电源失压后, 不论其进线断路器是否断开, 备自投装置启动延时后总是先断开该断路器, 确认该断路器在跳位后, 备自投逻辑才进行下去。这样可防止因工作电源在其它地方被断开, 备自投动作后合于故障或备用电源倒送电的情况。备自投动作跳开主供电电源开关后, 下一步就是将备用电源开关合上。但是在现场的安装调试中发现, 备自投在跳开主供电电源开关后, 不再继续进行后续的备用电源自投逻辑行为, 备自投动作失败。

经过分析, 发现备自投装置跳闸触点接至了线路开关的手跳回路。于是备自投动作跳进线开关的同时, 复归了线路保护装置的 KKJ 触点, 备自投判断为手动跳闸, 对备自投进行了闭锁。这样接线的初衷是想备自投动作跳进线开关的同时闭锁进线开关的重合闸。但是在这种运行方式之下, 进线的保护是处于停用状态, 其跳合闸出口压板均处于断开位置。因此进线开关的重合闸可以不用考虑, 备自投的跳闸触点可接至保护跳闸回路, 这样就不会对备自投进行闭锁。当然, 从二次回路的完善考虑, 可将备自投跳闸触点去启动一中间继电器, 利用此跳闸中间继电器的触点去实现跳进线开关的同时闭锁其重合闸。

1.3 进线电压的抽取

LFP-941 系列线路保护对线路电压的幅值未作要求, 就是说对于 LFP-941 系列保护来说, 线路电压可抽取 57.7 V, 也可抽取 100 V 的线路电压, 这对 LFP-941 系列线路保护的重合闸而言是没有区别的。因此在进行线路 TV 的二次接线时, 往往容易忽视, 造成这条线路电压抽取 57.7 V, 而另一条线路电

压抽取 100 V。如果备自投装置的无压定值按线电压即 100 V 进行整定,那就会在造成某种方式下的备自投不具备充电条件,导致备自投无法动作。

2 分段开关备用电源自投装置的应用

图 4 为低压母线分段开关自投主接线示意图。正常运行时,两段母线分列运行,每台主变压器各带一段母线。I、II 母互为暗备用,即 3DL 备用 1DL 和 2DL。分段开关备自投动作逻辑为(以方式 1: I 母失压为例):当 I 段母线失压,备自投装置动作,首先跳开 1DL 然后合上 3DL 由 2 号主变压器带 I、II 段全部负荷。

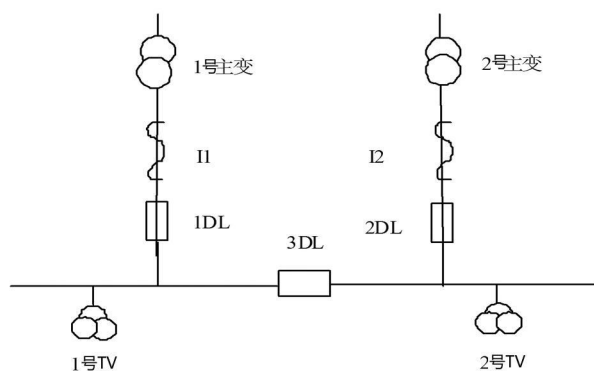


图 4 低压母线分段开关自投示意图

分段开关自投的充电条件: I、II 母均三相有压; 1DL、2DL 在合位, 3DL 在分位; 无外部闭锁开入条件。闭锁条件: 3DL 在合位; I、II 母均无压; 有外部闭锁信号; 1DL 2DL 3DL 的 TWJ 异常。

分段开关备自投装置需接入的电气量: 模拟量: 两条进线的单相电流; 两段母线电压。开关量: 1DL、2DL 开关位置接点 (TWJ); HHJ 闭锁自投开入 (此 HHJ 由 1DL 和 2DL 的 HHJ 触点串联后接入); 闭锁备投开入, 此开入用于主变压器保护装置的逻辑配合。由于 NSA-3151 带有分段开关操作回路, 分段开关位置已由内部自动产生, 不需再引入遥信开入。

2.1 HHJ 开触点的引取

主变压器保护 (如采用 LFP-900 系列变压器保护、NSA-3000 系列变压器保护) 一般带有 HHJ 合后备用触点, 因此 HHJ 触点可直接从保护屏端子上引取。如果所用主变压器保护没有 HHJ 合后备用触点, 可以采用加装重动中间继电器的办法解决。

2.2 分段备自投跳闸线的接入

因主变压器保护动作后不进行重合, 所以备自投

装置的跳闸线可以直接接入主变压器保护操作箱的跳闸回路。不用考虑闭锁重合闸的问题。

2.3 与主变压器保护的逻辑配合

当故障发生在主变压器差动保护区内, 那么差动或非电量等主保护动作立即无时限出口跳开三侧开关。跳开三侧开关后, 故障点已被切除 (隔离), 而此时中、低压侧的相应段母线均失电, 各侧备自投均应动作分别合上分段开关, 以保证供电的持续性和可靠性。同理, 本体重瓦斯和跳压瓦斯动作后切除三侧开关, 将故障变压器退出运行, 此时备自投应正确动作。所以变压器主保护动作后, 不应闭锁备自投。如备自投装置设有相应的备自投动作加速接点开入回路, 应在主变压器差动保护或本体保护动作全跳主变压器时, 加速低压侧分段备自投动作。

如主变压器中、低压出线元件故障而相应保护未能切除, 引起主变压器后备保护动作切除主变压器而造成母线失压时, 如果分段备自投动作将分段开关合上, 而此时故障依然存在, 就将造成故障程度加剧。所以此时必须闭锁分段备自投。因此, 主变压器中、低压侧后备保护动作, 其动作输出触点应相应闭锁本侧的分段备自投, 防止故障程度加剧。

3 维护调试中应注意的几个问题

目前, 备自投装置已广泛应用于 110 kV 变电站, 其可靠性直接影响着整个变电站乃至系统的安全稳定运行, 稍有不慎就会导致全站停电甚至大面积停电, 破坏系统稳定, 使事故扩大, 或对重要用户的供电长时间中断。因此, 在维护调试过程中, 应特别小心和注意。

1) 备自投装置新投运时, 必须做备自投装置的实际带开关跳、合试验, 不能用简单的模拟试验来代替。

2) 运行人员在投备自投装置时, 应注意装置的充电标志, 如有异常情况, 应及时反映, 以便迅速得到解决。

3) 在进行备自投装置的逻辑试验前, 必须核对清楚与本套装置有关的所有回路, 包括电流, 电压, 跳合闸出口, 开关量输入; 了解本装置所有关联设备的实际运行状态; 分析做备投逻辑动作时, 是否对运行设备有影响。

4) 备自投逻辑试验时, 必须严格按照备自投逻

辑进行,尤其应注意对备自投闭锁逻辑的试验;备投电压一般是直接从小母线引进装置,而母线全部停电的时候很少,因此需要将电压引进装置的线开掉,这时是不停电的带电作业,必须加强监护,而且要进行记录和包裹;试验备投逻辑动作前,应将备投装置上运行设备的跳合闸压板退掉,如对压板还较模糊,没有十足把握,就断掉运行设备的跳合闸连接线;做有无流判据试验时,如该线路处于运行中,必须在装置前将电流回路短接,短接需可靠;试验动作前,应通知联跳回路上的工作人员,以免对其他人员造成伤害。

5)需要停用备自投装置时,应先退出装置的出口压板,再退装置的直流电源,最后退出装置的交流电源;装置投运时,操作顺序恰好相反。

(上接第 44 页)

(U 采用当时母线电压一次值)

$$\textcircled{3} \text{ 电流二次值: } I = \frac{\text{电流一次值}}{\text{TA 变比}} = \frac{212}{120} = 1.77 \text{ A}$$

$$\textcircled{4} \text{ 电压电流夹角: } \varphi = \arccos 0.97 = 14^\circ$$

(由于有功 P 为正;无功为负,因此电压超前电流夹角 $\varphi = 360^\circ - 14^\circ = 346^\circ$ 或电流超前电压 14° (如图 1)。

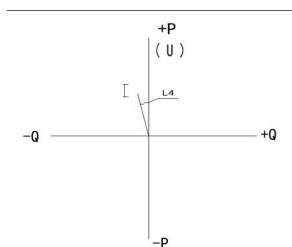


图 1 功角关系图

(3)利用理论计算得出的以上数据为参考,进行检查:

①电流幅值检查以及核实 TA 变比:用相位测试仪在保护屏端子排依次测出 a 相、b 相、c 相、n 相电流幅值,并记录。与计算出的理论值做比较应基本相等。如果误差较大则有可能:1)某一相 TA 变比接错。如该相 TA 二次绕组抽头接错;TA 的一次线未按整定变比进行串联或并联。2)某一相电流存在两点接地,如某一根电缆芯绝缘损伤,分流造成保护屏的电流减小。

②功率方向检查:带方向保护引入电压作参考量,用以判别故障点的正反向(电压接入的正确性应在带负荷之前进行检查。这里不再论述。),用相位

4 结束语

随着电网规模的不断扩大,网络结构的日益复杂,微机型备用电源自投装置已广泛应用于 110 kV 变电站、35 kV 变电站及 10 kV 开关站。它在防止系统稳定破坏或事故扩大,造成大面积停电,或对重要用户的供电长时间中断等方面的作用已日渐明显。对备用电源自投装置应用中相关问题的分析研究,能对实际的运行维护工作提供一些有用的参考,也对系统的安全、稳定、可靠、经济的运行具有实际价值。

(收稿日期:2009-01-09)

测试仪测试同名相电压电流夹角,并记录。检查方向指向是否正确,即 $\angle(U_A - I_A)$ 、 $\angle(U_B - I_B)$ 、 $\angle(U_C - I_C)$,测试出的角度应等于理论值。如果误差较大则有可能:该条线路开关 TA 二次绕组极性接反。另外,现在多数微机保护中零序功率方向均采用自产 $3U_0$ 、 $3I_0$,因而其方向正确性可以靠同名相电压电流夹角来保证。

③按上述方法,对照《标准化作业卡》顺序依次对与该线路有关的录波、110 kV 母差、测量、计量回路进行测试并认真记录相关数据。

3 结 语

现场工作虽然十分繁琐,但只要每项工作开始前认真做好现场勘察,制定符合现场实际情况的《标准化作业卡》并认真执行,再复杂的工作都会顺利完成。

参考文献

- [1] 朱声石. 继电保护原理与技术 [M]. 电力工业出版社.
- [2] 山东工学院, 山东电力局. 电力系统继电保护 [M]. 水利电力出版社.

(收稿日期:2008-12-18)

浅谈数字化变电站电气二次架构设计

汪熙珍

(四川电力设计咨询有限责任公司, 四川 成都 610016)

摘 要:通过对数字化变电站架构的论证,设计出基于 IEC 61850 通信协议构建的信息采集、传输、处理、输出过程全部数字化的变电站,实现数字化变电站的技术创新。

关键词:数字化变电站电气设计;全部数字化;效益

Abstract Through the demonstration to the frame of digital substation, the fully digital substation with information gathering, transmission, handling and output is designed based on IEC 61850 Communications Protocol, which realizes the technical innovation of digital substation.

Key words electrical design of digital substation; fully digital; benefit

中图分类号: TM752 **文献标识码:** B **文章编号:** 1003-6954(2009)03-0068-03

1 数字化变电站与常规综自站之比较

变电站自动化技术经过十多年的发展已经达到一定的水平,目前各新建的变电站基本都采用计算机监控系统、微机型的继电保护及安全自动装置,装置和系统之间可通过串口或网口交换信息,构成变电站综合自动化系统。

常规的综合自动化系统在逻辑结构上为“两层一网”结构,两层即“站控层”、“间隔层”,一网即“站控层”网络。常规的综合自动化系统实现了信号处理的数字化、从间隔层到站控层信息传输的数字化,但一次设备仍为传统设备,间隔层到一次设备之间仍采用电气回路通过电缆连接,接线复杂,控制电缆用量较大。

数字化变电站是指变电站的信息采集、传输、处理、输出过程全部数字化,基本特征为设备智能化、通信网络化、模型和通信协议统一化、运行管理自动化等。数字化变电站建设的理想目标为“同一个世界,同一个标准”,智能设备可在变电站通信网络上“即插即用”。

数字化变电站在逻辑结构上为“三层两网”结构,三层即“站控层”、“间隔层”、“过程层”,两网即“站控层”网络和“过程层”网络。

数字化变电站与常规综自站相比:

①增加了过程层,这是数字化变电站最显著的特

点,即将一次设备纳入了变电站通信网络,是变电站自动化技术发展的重大变革。

②间隔层设备网络化,直接接到站控层交换机,取消了串口转以太网的接口装置,信息交换速率大大提高。

2 数字化变电站设计

2.1 数字化变电站设计特点

(1) 采用计算机监控系统,间隔层与站控层通过以太网通信。

(2) 全站采用电子式互感器,配置微机型的保护、测控装置及数字式电能表,互感器的合并单元与保护、测控及电能表之间通过光纤通信,采用 IEC61850 协议。

(3) 间隔层和一次设备均配置智能终端,智能终端之间通过光纤通信,取代了开关场至保护、测控柜之间的电缆连接,保护、测控装置与智能终端之间通过传统电气回路连接。示意图见图 1。

2.2 数字化变电站架构设计目标

设计出基于 IEC61850 通信协议构建的信息采集、传输、处理、输出过程全部数字化的变电站,实现数字化变电站的技术创新。

2.3 数字化变电站架构设计的实现

数字化变电站架构设计包括智能设备、通信规约的选择和网络结构的设计见框图 2。

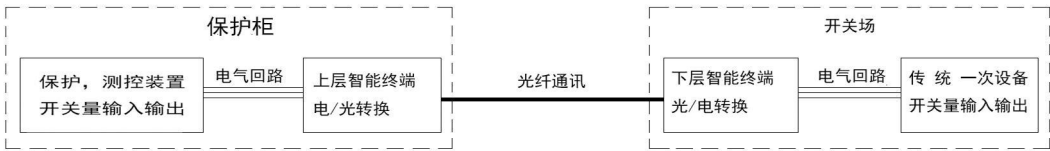


图 1 电气回路连接

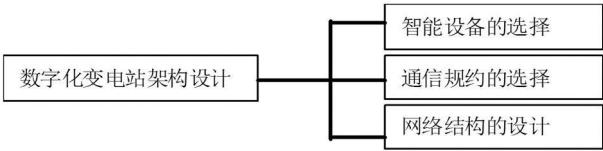


图 2 数字化变电站架构设计

2.3.1 智能设备的选择

数字化变电站的智能设备包括智能开关、电子式互感器及二次设备。网络化的二次设备是数字化变电站的必然选择,但智能开关和电子式互感器的选择却存在不同方案。见框图 3。

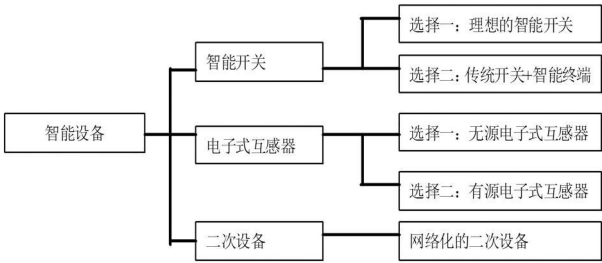


图 3 智能设备的选择

(1)智能开关的选择分析 (表 1)

表 1 智能开关的选择分析

智能开关	理想的智能开关	传统开关 + 智能终端
设备特点	具有智能控制、在线监测及自诊断功能；机构的电子化操动；具有数字接口，可接入过程总线，智能化程度高	常规的控制及操动方式，无在线监测及自诊断功能；具有数字接口，可接入过程总线，智能化程度低
应用业绩	国内没有	较多
可靠性	未知	较高
设备费用	很高	一般
可实施性	差	好
结论：选择传统开关 + 智能终端作为智能开关的实现方案		

(2)电子式互感器的选择分析 (表 2)

(3)二次设备

选择网络化的二次设备。

2.3.2 通信规约的选择

数字化变电站的网络分为站控层网络和过程层网络,不同的网络有不同规约选择见图 4。

表 2 电子式互感器的选择分析

电子式互感器	无源电子式互感器	有源电子式互感器
构成原理	基于 Faraday磁光效应电流互感器及 Pockels电光效应电压互感器	基于 Rogowski线圈或低功率线圈的电子式电流互感器;电阻、电容、电感分压的电压互感器。
设备特点	基于有关光学传感技术,一次侧光学电流、电压传感器无需工作电源,是独立安装的互感器的理想解决方案,正在进行实用化研究。	互感器传感头部分具有需用电源的电子电路,采用激光供能的办法,能较好的解决电源问题,已获得较多应用
应用业绩	少	较多
可靠性	差	较高
设备费用	高	较高
可实施性	差	好
结论:选择有源式电子互感器		

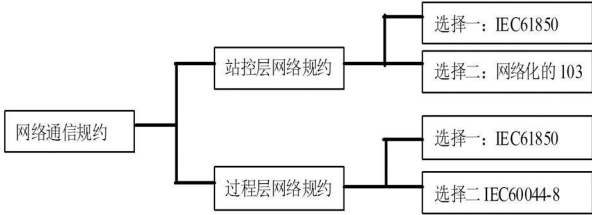


图 4 网络通信规约的选择

(1)站控层网络规约的选择分析

(2)过程层网络规约的选择分析 (表 3)

2.3.3 网络结构的设计

网络结构的设计分为站控层网络方案和过程层网络方案设计,见图 5。

数字化变电站站控层网络方案比较成熟,一般采用星型以太网,不需论证分析 (见框图 6)。

过程层网络是数字化变电站特有的网络,目前没有成熟的方案。

为实现“设计出信息采集、传输、处理、输出过程全部数字化的变电站”这一目标,数字化变电站架构

2.4 数字化变电站架构设计的结论

分析架构设计方案可以看出:① 变电站计算机监控系统基于 IEC61850通信协议构建;②信息处理:

表 3 站控层网络规约的选择分析

站控层网络通信规约	网络化的 103	IEC61850
特点	IEC60870—5—103 规约的网络版,采用传统的面向功能的设计方式	基于通用网络通信平台的变电站自动化系统唯一国际标准,面向对象设计,是构建数字化变电站的理想平台。
应用业绩	较少	较少
接口类型	以太网	以太网
互操作性	较差	好
适用范围	对实时性要求不高的以太网通信	基于网络平台的各种实时和非实时通信
软件费用	较低	较高
可实施性	好	较好

结论:选择 IEC61850 规约

表 4 过程层网络规约的选择分析

过程层网络通信规约	IEC60044—8	IEC61850
特点	电子式互感器传输采样值的国际标准,采用 FT3 帧格式,实时性极好,传输延时固定	基于通用网络通信平台的变电站自动化系统唯一国际标准,面向对象设计,是构建数字化变电站的理想平台。
应用业绩	较多	较少
接口类型	串行口	以太网
互操作性	差	好
适用范围	实时性要求好的串口通信,如三相电流电压数据之间的同步,差动保护数据之间的同步等。可采用插值法实现自同步,可靠性高	基于网络平台的各种实时和非实时通信。传输延时不固定,用于采样数据同步时需依赖于外部同步器,不能自同步,可靠性较差。
软件费用	较低	较高
可实施性	好	好

结论:采用 IEC61850 与 IEC60044—8 相结合的方式,各取所长。对于单间隔不需要数据同步的二次设备,采用 IEC61850 规约传输,对于跨间隔需进行数据同步的二次设备,采用

设计的最佳方案见框图 7。

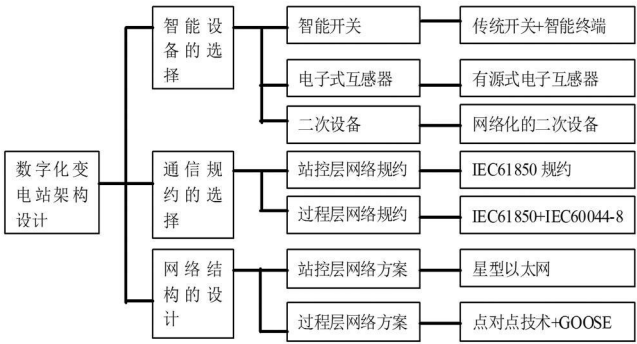


图 7 数字化变电站架构设计的最佳方案

全站配置微机型保护、测控等智能设备,信息的处理实现数字化;③采样信息的采集、传输:采用了电子式互感器,采样值就地数字化后以光纤送给各二次设备,实现了采样信息采集、传输的数字化;④控制命令的输出、传输:保护、测控设备的跳合闸控制命令直接以数字编码形式通过光纤传送到智能终端,实现了控制命令输出、传输的数字化;⑤开关量采集、传输、输出:一次设备的开关量信号通过智能终端就地数字化后通过光纤上送给二次设备,二次设备的开关量输出同样以数字信号通过光纤下到智能终端对开关进行控制,实现了开关量信息的采集、传输、输出数字化。

2.5 数字化变电站设计的效益

2.5.1 技术效益

- (1)实现了数字化变电站的技术创新。
- (2)提高变电站信息共享和自动化水平:数字化变电站将互感器和一次设备纳入变电站通信网络,且二次设备网络化,大大提高了信息共享水平和自动化水平。
- (3)提高变电站运行的可靠性:数字化变电站基本取消了复杂的二次回路接线,代之以光纤或网线通信,大大提高了系统的可靠性,有利于检修、运行;且大大降低了土建支架,减少了钢材量。
- (4)简化了二次设备装置的结构:数字化变电站二次设备取消了采样保持、多路转换开关、A/D 变换等环节,提高了装置的可靠性。

(5)摆脱了电磁兼容的难题,实现了一次设备和二次系统之间的电气隔离。常规综合自动化为解决电缆传输信息时对二次设备带来的各种干扰问题,对电缆、保护装置的接地、屏蔽有着严格的要求,需二次设计及施工重点考虑;而数字化变电站通过光纤传输数字信号可从根本上解决变电站的电磁兼容问题。

(下转第 81 页)

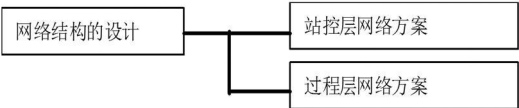


图 5 网络结构的设计

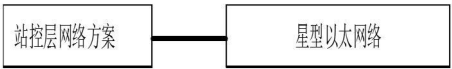


图 6 站控层网络方案

IEC60044—8 规约传输。

使用寿命。

换。

4 存在的问题

1)老工艺生产的绝缘子仍大量挂网运行。1997、1998、1999年产的复合绝缘子大量在电网上使用,共计有 8 570支,其中 110 kV有 6 063支、220 kV有 2 015支、500 kV有 492支。

2)对绝缘子的检测手段有限。由于复合绝缘子内部故障的监测手段有限,很难提前发现复合绝缘子的内部故障,特别是复合绝缘子的端部密封试验开展难度较大。

3)在运复合绝缘子的抽检工作难度较大。四川省电力公司已出台复合绝缘子运行规程,但复合绝缘子按规程的抽检工作开展较少,目前没有形成一套完善的抽检机制。

5 复合绝缘子运行维护工作思考

1)安排更换挂网运行的早期复合绝缘子产品。对采用淘汰工艺生产的早期绝缘子逐步安排进行更

2)开展复合绝缘子抽检工作。开展全省复合绝缘子样品抽检工作,特别是端部密封试验。

3)加强对质量可疑厂家运行产品的跟踪监测。四川省在运复合绝缘子生产厂家较多,部分厂家已经倒闭,部分厂家生产能力较小,应加强对此类厂家的产品进行加量抽检,以便及时发现问题。

4)加强在运复合绝缘子单改双工作。对大档距、大高差、重要跨越点、居民区的复合绝缘子实施单改双工作,以避免掉串导致的不良后果。

5)开展红外成像仪检测复合绝缘子研究。根据复合绝缘子出现缺陷后,可能产生热成像图像突变的情况,着手研究红外成像仪检测复合绝缘子。

6)开展在运复合绝缘子运行情况研究与分析。进一步摸清四川省在运复合绝缘子情况,针对不同厂家、不同运行条件、不同运行环境,开展早期复合绝缘子运行情况分析,抽取一定样品开展分析工作,对早期各厂家的复合绝缘子进行全面、正确的评估,特别是要加大对耐张和大档距杆塔复合绝缘子的运行情况研究。

(收稿日期: 2008—12—01)

(上接第 70 页)

(6)完全不受负载影响,消除了测量数据传输过程中的系统误差。数字化的电流电压信号在传输到二次设备和二次设备处理的过程中均不会产生附加误差,提升了保护系统、测量系统和计量系统的系统精度。

(7)简化了二次系统的试验:①一次和二次无直接电联系,不存在 TV 短路, TA 开路问题,提高了现场试验接线安全性;②数字信号替代了传统模拟量输入信号,无需进行模拟量输入准确度校验;③无需校验互感器的极性,无需进行二次回路接线检查;④ 无需回路绝缘电阻测试,回路压降测试,回路接地的检查。

2.5.2 经济效益

(1)常规的综合自动化变电站仍存在复杂的二次回路,控制电缆用量较大,且电压等级越高,控制电缆用量越大。

数字化变电站中大量采用光纤和网线作为信息交换的介质,控制电缆用量将明显降低,体现了一定的经济效益。

(2)全站按照 IEC 61850通信标准构建,体现了国际自动化技术发展最新潮流和理念。基于 IEC 61850构建的自动化系统具有良好的互操作性和长期稳定性,降低了改建、扩建的系统升级、调试成本,保护了用户的投资。

2.5.3 社会效益

(1)电子式互感器的应用解决了传统互感器的饱和、铁磁谐振、绝缘油爆炸、六氟化硫泄漏等问题,体现了环保、节能、以人为本的理念。

(2)控制电缆用量大大减少,降低了有色金属消耗,有利于社会的可持续性发展。

参考文献

[1] 李九虎,郑玉平,古世东,须雷. 电子式互感器在数字化变电站的应用 [J]. 电力系统自动化, 2007(7): 94—98.

[2] 杨奇逊. 变电站综合自动化技术发展趋势 [J]. 电力系统自动化, 1995, (10): 7—9.

[3] 高翔. 数字化变电站应用展望 [J]. 华东电力, 2006, (8) 47—53.

(收稿日期: 2009—01—04)

基于移动数据库技术的 GPS 电力线路巡视管理系统

熊 勇, 余 宁

(四川省电力公司遂宁公司, 四川 遂宁 629000)

摘 要:提出了一种基于移动数据库技术的 GPS 电力线路巡视管理系统, 运行结果表明该系统可以有效地提高电力线路巡视管理水平。

关键词:移动数据库; GPS; 电力线路; 线路巡视; 管理系统

Abstract: A line inspection management system based on mobile database and GPS is proposed. The operation results show that the management level of line inspection can be improved effectively with the system.

Key words: mobile database; GPS; power line; line inspection; management system

中图分类号: TM769 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)03-0071-02

电力线路巡视工作是电力企业安全生产中的一个重要环节, 通过科学有效的巡视, 工作人员可以及时发现线路存在的缺陷, 及时处理, 避免事故的发生。传统巡线方式都是巡视人员手工填写相关记录, 巡视结束后再将相关记录输入计算机保存。这种方式费时、费力、出错率高, 并且巡视记录无法进行统计及综合分析。同时由于线路巡视工作环境恶劣, 劳动强度大, 漏巡、巡视不到位的现象时有发生, 为电力企业的安全生产埋下了很深的隐患。

近年来, 移动数据库技术、无线定位技术日渐成熟。能否在传统的巡线方式中引入现代信息技术, 弥补传统巡线方式的不足呢? 故在这方面做了些有益探讨, 提出了一种基于移动数据库技术及 GPS 定位技术的电力线路巡视管理系统。

1 体系结构及功能

1.1 体系结构

系统建设总体思路是利用 GPS 定位技术在巡线过程中进行定位数据采集, 以移动终端设备 (PDA) 作为载体实现标准化巡线作业现场信息化应用, 结合数据移动技术将标准化巡线记录同步到服务器, 实现综合查询统计分析等功能。它以服务器为主站, 以掌上电脑 (PDA) 作为移动终端, 以商业数据库作为数据支撑, 构架了 C/S 结构应用系统, 如图 1 所示。

1.2 巡视到位管理功能

GPS 卫星定位技术是在计算机应用和实践中产

生并发展起来的广泛应用于地域定位、交通等领域的一种自动识别技术, 具有输入速度快、准确度高、成本低、可靠性强等优点, 在当今的自动识别技术中占有重要的地位。

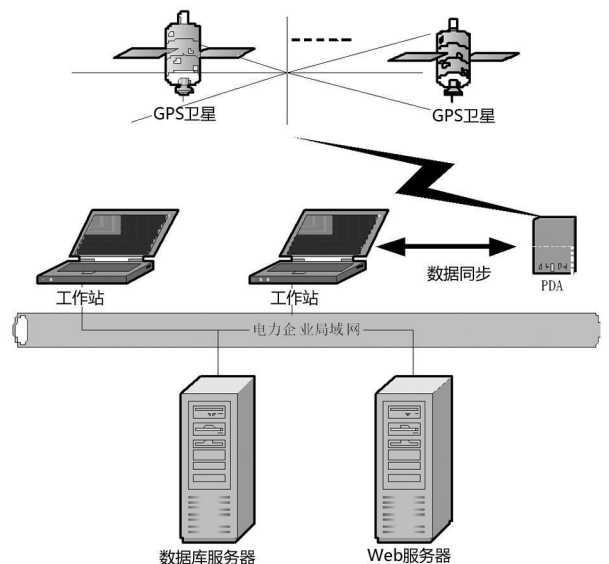


图 1 系统体系结构

本系统采用 PDA 内置 GPS 定位模块的方式实现巡视到位的管理; 首先通过初始定位数据建立巡视线路的三维基准数据, 巡线时 PDA 会对工作人员位置进行定位, 并自动将定位结果与线路三维基准数据进行对比。如果对比结果在设定的阈值以内就认为工作人员到达巡视位置; 否则, 就认为工作人员未到达巡视位置。如果工作人员没有到达巡视位置, 就不能录入巡视数据, 即巡视不到位。

1.3 综合查询统计分析功能

巡线工作主要是在野外,工作地点变换不定,要实现综合查询统计分析功能,必须要有支持移动计算环境的移动数据库。本系统从移动数据库的数据同步、复制缓存及数据安全三方面入手保证移动数据库的可靠稳定运行。

1.3.1 数据同步

由于 PDA 与主站之间采用无线通信,受巡线工作环境影响,两者之间会出现通信中断的现象。巡线工作中,在 PDA 与主站通信中断的情况下,PDA 或主站仍需要对数据进行操作,这样就会导致主站和 PDA 之间数据不一致。因此就必须用某节点数据集去刷新其他节点的数据,达到各节点数据一致的目的,这就是数据同步。它包括完全同步和差异同步两种同步策略。本系统采用差异同步策略,包括下载同步及上载同步,实现方式如下:

(1) 数据下载流程

① PDA 监听,等待同步服务器发送数据流;

② 下载数据流,写入本地数据副本,刷新本地副本的过期数据;

③ 接收到下载结束标志;

④ 断开与服务器的连接;

⑤ 同步过程结束,返回。

(2) 数据上载流程

① 开启同步进程;

② 与服务器建立连接;

③ 数据库准备数据,输出到缓冲区;

④ 数据发送给服务器,返回。

1.3.2 数据复制缓存

要实现数据同步需要数据的复制技术与缓存技术。数据复制技术指用同步数据集对各个节点进行数据覆盖,达到数据一致的目的。数据缓存技术指在移动环境中由于外界因素影响造成通信中断或者严重延时的情况下保证数据应用不受影响的技术,考虑到巡线时具有带宽不足和断接频繁的情况普遍存在,数据复制缓存技术是保证该系统稳定运行的关键技术。

典型的数据复制技术一般采用两级复制体系或者三层复制体系。本系统采用两级数据复制技术。两级复制体系将数据库视为数据的集合,每个数据有一个主版本和多个副本,主版本存储在被称为主节点的固定节点上,副本同时存放在主节点和移动节点,数据更新时暂时更新到数据副本,同步时通过冲

突检测处理后更新主版本,实现数据更新复制。

本系统通过对巡视杆塔进行分片区管理,进行适当的杆塔数据分片复制,即把不同片区的杆塔数据复制到不同的移动设备终端上(PDA),每个移动设备终端(PDA)上的应用只需要存取自己被分配的数据分片,并且一移动终端设备对其他数据进行访问时只有读权限不允许对数据修改,并且在进行数据同步时主服务器只要辨别出移动终端设备的分区识别码就可以很快地进行数据的同步操作,在同步时采用差异同步法,只存取用户数据发生变化的数据项,并引入主动数据库的思想,当移动终端设备(PDA)中数据项发生变化时能主动触发和主服务器数据的同步一致性。

1.3.3 数据安全

移动数据库技术采用的是无线通讯技术,数据的无线传输比固定的线路传输更容易盗用和欺骗。此外,移动终端设备具有较高的移动性、便携性和非固定的工作环境,也带来潜在的不安全因素。同时某些数据的个人隐私性又很高,因此,在防止碰撞、磁场干扰、遗失、盗窃等对个人数据安全的威胁上需要提供充分的安全性保证,针对移动数据库的安全隐患,本系统采取的安全措施主要有:

(1) 对移动终端设备(MC)认证;防止非注册 MC 的欺骗性接入。

(2) 对无线链路加密,防止第三方盗用。

(3) 对移动用户提供身份保护,防止用户位置泄密或被跟踪。

(4) 对下载的数据副本加密存储,以防止移动终端物理丢失后的数据泄密。

2 系统工作流程

主站子系统建立线路巡视基础数据,建立可维护的标准化巡线作业指导书并存储于数据库当中,完成系统初始化。根据需要新建巡视计划,并报上级审批,审批通过后由计划制订人分解任务并下发给巡视人员。巡视人员接受任务后通过 PDA 的数据同步下载功能下载巡视任务到现场巡视。巡视过程中首先进行 GPS 定位,系统自动调出相应杆塔数据与标准化巡视作业书供巡视人员填写。填写完成后通过数据同步上载功能将巡视结果同步到主站服务器,

(下转第 92 页)

对于压力钢管,主要承受内水压力。明管段最小允许壁厚为:

$$\text{最小允许壁厚 } \delta = \frac{PD_i}{2[\sigma]\Phi - P}$$

因为明管段设计壁厚为 36 mm,直径 1 200 mm,按 SD 144《水电厂压力钢管设计规范》,允许应力 $[\sigma]$ 为 163 MPa 焊缝系数 0.85,考虑腐蚀及磨损裕度 2 mm,实际最小需要壁厚为 $\delta+2$ mm。根据计算可知,明管段压力钢管实际最小需要壁厚为 27 mm。

而实际检查发现连接段最小壁厚 38.1 mm,和它连接的上游直管最小壁厚为 36.4 mm,连接缝最大错边量为 10 mm,连接处最小有效壁厚为 26.4 mm,不能满足要求,因此需要处理后才能保证运行的安全。

4 结论及建议

前面对焊接好后的 1 号机组球阀进水接管,在假设无初应力的条件下、水压力为 6 MPa 时,进行了整体有限元计算。计算结果表明,1 号机组球阀进水接管大部分区域内应力水平为 80 到 90 MPa 而 1 号机组球阀进水接管所用材料 16 MnR 的许用应力为 163 MPa 因此若 1 号机组球阀进水接管无初应力,则 1 号机组球阀进水接管是安全的。

然而,现场施工时,是将 1 号机组球阀进水接管

剖分为四部分,对水平两块施加推力使最外端产生了 34 mm 的水平位移。在不加热的情况下,有限元计算结果表明,该两块根部应力高达 1 500 MPa,因此,如果现场施工后不退火(即使在焊接时采取了预热措施),则会产生很大的残余应力,使 1 号机组球阀进水接管不安全。

1 号机组球阀进水接管最小需要壁厚为 27 mm,而连接处最小有效壁厚为 26.4 mm,不能满足要求,需要处理后才能保证运行的安全。

鉴于上述原因,建议:

①钢管对接焊缝按 DL 5017《压力钢管制造安装及验收规范》要求,在安装时严禁强力拼装,这方面应加强监督,严格控制安装质量。

②焊缝对接错边量严重超标的缺陷,应采取相应措施进行处理。

③在对 1 号机组球阀进水接管剖分部分水平两块现场施焊后必须进行退火处理,以消除根部残余应力,保证 1 号机组球阀进水接管的安全。

参考文献

- [1] SD 144—1985,水电站压力钢管设计规范[S].
 - [2] DL 5017—1993,压力钢管制造安装及验收规范[S].
- (收稿日期:2009—02—11)

(上接第 72 页)主站完成考核、查询、统计等功能。

3 结 论

从电力企业线路巡视业务的现状入手,分析了线路巡视信息化管理的需求,提出并实现了一种基于移动数据库技术的 GPS 电力线路巡视管理系统。系统运行效果表明以移动数据库技术结合移动终端与 GPS 定位技术的巡线管理系统能够适应标准化巡线管理的要求,能够极大提高巡线工作效率和电力企业的生产管理水平。

参考文献

- [1] 胡虚怀,郑若忠.移动数据库及其关键技术[M].计算机系统应用,2000.
- [2] 姚敏锋,张晶.嵌入式移动数据库的应用研究.电脑与信息技术[J],2007,15(5):27—30.

- [3] 刘远东.嵌入式移动数据库及其应用[J].深圳信息职业技术学院,2003,(1):31—34.
- [4] 林高德,周书民.嵌入式移动数据库的关键技术[M].现代计算机,2006.
- [5] 龚春红,金敏.移动数据库关键技术的研究与分析[J].科学技术与工程,2007,7(9):1911—1915.
- [6] 黄聪明. Pocket PC 数据库应用程序设计[M].北京,清华大学出版社,2002.
- [7] 涂小朋,汪林林.分布式空间数据库中基于事务的客户端高速缓存技术研究[J].计算机科学,2004.
- [8] 邹和东,邱吉福.电力企业用电检查管理模式的研究与探讨[M].中国电力教育,2007,243—244.
- [9] 周毓林,宁杨,陆贵强,付林林. Windows CE .NET 内核定制及应用开发[M].电子工业出版社,2005.2.

作者简介:

熊 勇(1974—),男,四川仁寿人,1998 年毕业于哈尔滨理工大学高电压技术及设备专业,工程师,从事安全生产技术管理工作。

(收稿日期:2009—03—07)

智能路由多层交换机在变电站自动化系统中的应用

冯世林

(四川电力试验研究院, 四川 成都 610072)

摘 要:针对电力系统变电站自动化系统结构现状,分析智能路由多层交换机在变电站自动化系统中的应用和前景。为提高变电站自动化系统的技术水平和功能优化提供意见和参考。

关键词:路由;多层;交换机;变电站自动化系统;应用和展望

Abstract Aiming at the current structure of substation automation system in power system, the application of intelligent multi-layer routing switch to substation automation system and its expectation are analyzed. It gives a reference for the technical level improvement and function optimization of substation automation system.

Key words route; multilayer; switch; substation automation system; application and expectation

中图分类号: TM762 **文献标识码:** B **文章编号:** 1003—6954(2009)03—0073—04

作出一些分析和建议。

1 智能交换机的特性

计算机网络自 20 世纪 90 年代就开始普遍进入生产和生活的各个领域,历经十多年的发展和应用,网络技术和计算机技术在软硬件等各个方面都有了突飞猛进的发展和进步,并且以智能路由多层交换机(以下简称智能交换机)为骨干的智能型交换网络,都比较成熟和可靠了,这些都为电力系统在厂站自动化领域的发展和进步提供了良好的物质和技术基础。

由于交换机在变电站通讯网络中处于比较重要的地位,无论是间隔层或站控层的监控和保护设备,都必须通过铜缆或光缆将自身的通讯报文汇集到交换机并转发出去,大量的数据交换要求交换机必须具有充足的交换容量和快速的交换能力,以满足监控系统通讯的可靠性和实时性,因此采用新型的智能交换机或充分挖掘现有交换机的通讯潜力就显得十分必要了。目前在通讯行业常用的智能交换机虽然生产厂家各不相同,但都具有一些共同的特性,主要是:支持交换机 IP 地址配置和管理;包含多个电口和光口;具有全线速二层交换、三层路由能力和 DHCP 功能;支持端口配置、捆绑、隔离和镜像;支持 802.1Q 的虚拟局域网(VLAN);提供智能的流分类和完善的 QoS 特性;具有 Spanning Tree 生成树、单播和组播等特性。下面就上述一些特性如何在电力系统的变电站自动化系统中进行应用

2 智能交换机在变电站应用

2.1 智能交换机的远程访问 配置功能及应用

电力系统现有的变电站很多时候采用了较低端的二层交换机甚至是 HUB 集线器,这些设备一般都不具有 IP 地址配置和管理功能,因此难以对其进行监视、配置和优化,一般只能通过查看其面板显示或在监控后台简单查看其工况,无法通过 console 接口在本地配置,更无法通过 FTP、TELNET 及 WEB 等方式远程登录和配置,给调试和维护带来极大不便。进而,基于智能交换机的多种高级功能及优化措施也就无从谈起了。所以若采用智能交换机则可以方便灵活地进行远程就地的登录和配置,例如从远程查看本机名称及地址、查看端口流量或修改端口配置、查看或修改 VLAN 设置、配置路由和 DHCP、优化数据流向等等。

智能交换机的背板带宽和转发带宽都比二层交换机高,具有全线速二层交换能力,能够满足变电站事故时数据报文突发性猛增的运行特点。而其三层路由功能通过设置静态路由(static route)、动态路由(dynamic route)和访问控制列表(access control list ACL),可用于优化变电站通讯数据流向,增强网络安全性,并在使用 FDDI 光纤环网或以太环网的变电站提高通讯冗余可靠性。其多个电口和光口均采用模

块化的配置,可以灵活地改变通讯端口类型,便于扩充和重新布置。而且智能交换机的路由是三层交换机区别于二层交换机的重要概念。三层交换机实现了 IP 协议及相关的整个 TCP/IP 协议栈,可以提供三层路由转发功能,即跨越不同 IP 网段的 IP 报文转发。现阶段变电站通讯网络结构越来越趋向于按电压等级和电气间隔划分网段,在数字化变电站中这种趋势更加明显,即不同间隔之间一般不能直接通讯,必要的共享信息可通过路由功能实现,这样就减小了报文的广播域和冲突域,有利于提高网络通讯效率。

2.2 智能交换机的端口特性及应用

智能交换机支持端口配置、捆绑、隔离和镜像的特性,使得可以根据不同的电气设备类型,考虑其不同的通讯带宽要求,对其在交换机相连的端口上有针对性地进行配置。如主变间隔、线路间隔和断路器间隔,其运行地位比较重要,且间隔内设备的数量和遥测、遥信通讯量较大,可以将其端口配置为 10 M 全双工/无流控模式,在单个端口速率不足时还可将几个端口捆绑起来使用,以保证其通讯的实时性和可靠性,同时还可以对部分端口在相互之间进行隔离,以减少广播数据包,降低报文收发冲突几率;而对一些通讯量较小的从属设备,以及一些由于安装位置较远而通讯易受干扰的设备,则可以配置为 10 M 全双工/有流控模式,以降低通讯速率的方式来减少误码率和增加传输距离,重点保证其通讯可靠性。同时,这部分低速端口未使用的背板带宽又可以更好地保证重要设备的通讯,从而形成良性循环,充分利用智能交换机强大的通讯能力。

智能交换机的端口镜像功能可以将一个或多个端口的数据复制到指定的交换机端口上,从而可进行网络流量分析和错误诊断等。可以将协议分析仪逐级接入,以查看网络通讯设备或自动化系统各个间隔装置的通讯报文,以便快速进行故障定位;也可以接入流量分析仪,采样或加量模拟网络通讯流量,以评估网络在变电站正常运行和事故时的网络负载率。

2.3 智能交换机支持 VLAN 的特性及应用

智能交换机支持 802.1Q 的 VLAN 是一个比较重要的特性。VLAN 是目前构建局域网普遍采用的技术,被称为虚拟局域网。传统局域网的组网方式是以交换机为主要联网设备,受到物理线路布局的限制,所有与交换机连接的下级设备都处于同一个广播域和冲突域中。可以将任何一个端口或端口的集合

都看作是一个 VLAN。VLAN 的划分不受硬件设备物理连接的限制,用户可以通过命令灵活地划分端口,创建定义 VLAN。因而可以以变电站的电气间隔为单位,将交换机端口划分成多个 VLAN,具体来说,使用 VLAN 有如下好处:

① VLAN 能帮助控制流量:在传统网络中,不管是否必要,大量广播数据被直接送往所有网络设备的所有端口,从而容易导致网络堵塞。而 VLAN 能设置每个 VLAN 中只包含那些必须相互通信的设备,从而减小广播域和冲突域,提高网络通讯效率。比如在某个线路间隔 VLAN 内的断路器、隔刀和地刀的状态和控制报文等信息,只会向交换机上联端口转发,而不会向其他间隔的端口广播,对于多回出线的变电站(十回以上),尤具意义。特别是对于变电站内不同电压等级的设备,由于这些设备基本上没有相互之间直接通信的需求(变压器例外),如果它们处于同一网段,其广播域和冲突域巨大,极大影响网络通信效率,如果按电压等级和电气间隔划分 VLAN,则可有效改善通信效率。

② VLAN 提供了更高的安全性:每一个 VLAN 都被配置成拥有唯一 IP 地址且处于不同子网段的路由接口,在每个 VLAN 中的设备只能与在同一 VLAN 中的设备通信。例如,主变压器间隔 VLAN 和线路间隔 VLAN 内的设备可以和本间隔内的其他设备通信。但如果在主变压器间隔 VLAN 中的设备要跟线路间隔 VLAN 中的设备通信时,即使它们在物理上属于同一个交换机的同一个 I/O 模块,那么也必须通过交换机进行路由才能进行。这样,两个间隔就不能直接通信,而且可以通过配置路由和访问控制列表(ACL)来允许或禁止其相互通信,从而提高系统安全性能。而对于变压器保护、母差保护、备自投等需要多间隔信息互通的设备,则可以通过指定各个间隔端口可以属于多个 VLAN 的方式,或者通过二层/三层组播方式达到互联的目的。

③ VLAN 使维护设备(如带 IP 地址的调试用 PC、保护测控调试仪、协议分析仪或流量分析仪等)的变更和移动更加方便:在传统网络中,维护人员不得不在维护设备的变更和移动上花费大量的时间和精力。如果维护设备移动到另一个不同的子网,那么每个维护终端的地址都得重新设置。而使用 VLAN 则不需要这些复杂繁琐的设置。VLAN 的分类,可以基于物理端口、802.1Q tag 标签或以上二者的组合,

定义起来非常方便,可以加快维护或调试的进度。

2.4 智能交换机提供智能的流分类和完善的 QoS 质量服务特性

QoS (quality of service) 的目的就是向用户的业务提供端到端的服务质量保证。它有一套度量指标,包括业务可用性、延迟、可变延迟、吞吐量和丢包率。QoS 在可预测性、可测量性方面比传统 IP 有了很大提高,带来了更高效的带宽使用率。QoS 通常有三种服务模型。

(1) 尽力而为的服务模型是最简单的服务模型,网络总是尽量按数据包到来的先后顺序处理数据包,而在可靠性、延时、抖动以及吞吐量方面不提供任何保证。它是互联网初期所采用的服务模型。这种模型的优点是简单,无需增加额外开销即可实现。但缺点也是明显的,在带宽不足的情况下,往往会得到最差的服务。

(2) 集成的服务是一种复合的模型。用户需求将在发送数据前向网络申请所需要的服务,网络则负责在应用的通信过程中为其所需要的资源(带宽、时延等)做出保证。应用程序在收到网络预留资源的确认信息后才开始发送报文,且发送报文被控制在流量参数规定的范围内。

(3) 差别服务模型也是一个多服务模型,可它通过对各种类型的数据包进行有效的分类,把要求相近的数据包划分成同一类包在网络中传播,使这一类包在网络中有一样的转发和缓冲特性,以此来实现某种程度的 QoS 保证,差别服务模型已成为目前应用最广泛的一种模型。

按照不同服务质量的要求,对报文进行分类形成多种形式的流,并可对这些流进行相应的处理。其实现方式为:① 拥塞管理:按照报文分类对报文进行队列调度管理,定义不同报文的发送优先级,解决有限带宽的拥塞问题。② 流量整形:对分类的报文按照要求的带宽为其分配一定的平均流量和突发流量。

目前电力系统变电站可将 QoS 应用于变电站视频监控系统,改善多达几十路的视频信号的画质。还可以将 QoS 应用于调度端、无人站和集控站,保障重点厂站的通信。在将来的数字化变电站中,由于交换机和以太网通信通道的大量使用,各个间隔的遥测、遥信、遥控及保护信号不再通过二次电缆传输,而主要是通过光纤、网线等介质,用以太网报文向各个设备和通讯层传输,对于重要设备的遥测、遥信和保护

报文进行分类并指定较高的优先级,以保证其实时性和可靠性。因此 QoS 的报文分类、处理和服务质量保证特性可以很好地服务于数字化变电站的各项通讯业务。

2.5 智能交换机具有 Spanning Tree 生成树功能

STP (spanning tree protocol) 目的是通过协商一条到根网桥的无环路路径来避免和消除网络中的环路,确保到每个目的地只有一条路径,如果某条链路失效了,根网桥知道存在冗余链路,它会启动先前关掉的这条冗余链路。STP 能在变电站通信网络中部署备份线路,能够保证在主线路正常工作时,备份线路是关闭的;当主线路出现故障时自动启用备份线路,切换数据流。STP 协议可以实现:为稳定的生成树网络拓扑结构选择一条根桥;为每个交换网段选择一台指定交换机;通过将冗余的交换机端口置为 Blocking 来消除网络中的环路。因此对于电力系统中大量的低电压等级的变电站,由于其通信网络一般为单网、单服务器结构,在不增加大的投资情况下,采用单环网和智能交换机 STP 特性以获得冗余通信链路,对于提高变电站通信可靠性具有一定的优势。

2.6 智能交换机单播和组播特性

目前基于以太网的 IPv4 通讯可以分为单播、组播、广播三大类。

通常的 IP 数据通讯都使用单播方式,即每个报文的接收者有一个明确的唯一的 IP 地址。

广播方式是各种报文无条件地发送给所有 IP 设备,网段内的所有 IP 设备都要接收这个报文,报文冲突的几率也就增大了,容易引起网络广播风暴和冲突。

IP 组播是一种点到多点的通信方式,用户可将一个数据流发送给多个接收者,支持组播的网络会自动只在必要且适当的网络节点上才复制组播报文,而不需要数据源重复发出多份数据,从而以最小的带宽占用将组播报文发送到所有的目的地,这样可以显著节省网络带宽占用。IP 组播又称为三层组播,与二层组播功能有区别。三层组播使用 IP 组播路由协议,从而可以在跨越多个三层设备,在多个网段之间选择组播转发路由,控制组播数据有效地转发到需要数据的网段,避免转发到不需要的网段,并可以抑制数据重复转发到一个网段上。而某些交换机具有的二层组播功能,主要是指在二层转发的过程中,通过 IGMP-SNOOPING 等手段获得 IP 组播的某些信息,

用有选择的转发代替二层广播,达到优化的目的。IP 组播在节省通信带宽、降低服务器和网络负载等方面较单播有许多优越性。

在目前变电站中,为了保证通讯的实时性和减小网络配置的工作量,往往采取单网段广播方式进行通讯,因此广播风暴也就无可避免了。广播风暴经常体现在保护、测控装置系统通信延时大,计算机程序反应慢,报文丢失或时标误差大等现象,甚至导致装置死机,影响变电站自动化系统通讯的实时性和可靠性,成为发生运行事故的隐患和故障分析时的信息盲区。因此根据变电站的实际规模和运行方式,适当地将通讯网络划分为多个网段,充分利用交换机的端口特性和 VLAN 特性,同时辅之以 QoS 及组播等配置,

可以较好挖掘交换机的通讯潜能,改善变电站通信网络的通讯效率。

3 结束语

智能交换机目前在电信行业已经进行了广泛的应用,在电力系统也有了逐步的使用,随着其价格的降低和性能的提升,在变电站自动化系统中大量应用智能交换机是具有现实可能性的。这对于电力工程人员在变电站调试和检修工作提出了新的要求,既懂电气又懂网络和通讯将是工程人员基本的素质和要求。

(收稿日期: 2008—12—10)

(上接第 38 页)

压,并经变压器耦合倒相后触发可控硅,此时,开口三角形被短接,产生强烈的阻尼作用使铁磁谐振迅速趋于衰减,其后,可控硅被恢复为阻断状态。可控硅分频消谐器工作原理类似于微电脑消谐器,为消谐工作提供了一种全新的思路。

10)对于线路不长的电网,在开口三角形绕组接 WNX 系列特定型号的微电脑多功能消谐装置,能消除高频、工频、分频谐振过电压。当系统发生单相接地时,给予判断,发接地信号,消谐装置不投,可以避免低值电阻长时间接在开口三角形侧导致互感器因过热而烧毁。缺点:当线路很长时,该装置对互感器瞬时低频饱和电流抑制较弱。

11)在 TV 的开口三角形处接吸能型消谐装置,此装置正由有关单位研制,其采用单片机控制,谐振时可以分析 TV 开口三角形的零序电压,且予以判定:①因系统单相接地而导致故障;② TV 因饱和引起谐振。并通过消能电容吸收能量最终达到消谐目的。见图 5,该装置能正确记录消谐次数,且能有效地区别谐振频率(高频、工频或分频)。

3 结 论

(1)对谐振力度不大的电网,可在 TV 一次中性点或开口三角形侧接入消谐电阻,此方法经济、便捷。

(2)对分频谐振频繁的电网,可采用 KFX 型可控硅分频消谐装置,其强有力的阻尼作用可使铁磁谐振迅速趋于衰减。

(3)对谐振频繁且线路不长的电网,可采用特定型号的 WNX 型微电脑消谐器,效果显著。

(4)对开口三角形已装设电阻(灯泡)后消谐效果不佳的电网,可在 TV 一次中性点处接入消谐器,还可以在开口三角形处改接零序 TV 或消谐器。

参考文献

- [1] 解广润. 电力系统过电压 [M]. 北京:水利电力出版社, 1985.
- [2] 杨恢宏,等. 单片机控制的吸能型消谐器研制 [J]. 四川电力技术, 2000, (3): 35—36.
- [3] 周泽存. 高电压技术 [M]. 北京:水利电力出版社, 1988.
- [4] 李达坚. 10 kV 电压互感器各种防谐振措施评述 [J]. 广东电力, 1999, 12(1): 34—37.

(收稿日期: 2008—12—07)

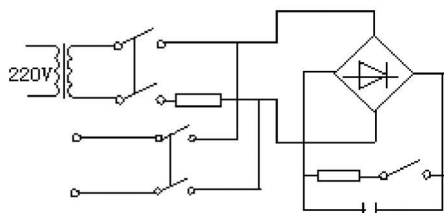


图 5 吸能型消谐器示意图

电流互感器典型故障案例分析

钟守熙

(成都电业局, 四川 成都 610016)

摘 要:通过对电流互感器典型故障案例的分析,指出了提高互感器产品设计、制造水平,把好安装验收质量关,加强运行维护和技术监督工作,是保证电流互感器安全运行的关键。

关键词:电流互感器;故障;对策

Abstract: According to the analyses of the typical failures of current transformer, it is pointed out that the design and manufacturing of current transformer should be improved as well as the acceptable quality of installation; the operating maintenance and technical supervision should be enhanced, which is the key to ensure the safe operation of current transformer.

Key words: current transformer; fault; countermeasures

中图分类号: TM45 **文献标识码:** B **文章编号:** 1003—6954(2009)03—0077—02

电流互感器的安全与否,直接影响到测量、计量的准确性和继电保护装置的正常运行,是供电安全和可靠的重要影响因素。在电网运行过程中,由于电流互感器产生缺陷,发生故障,影响电力安全生产,甚至导致停电、爆炸事故的情况仍然时有出现。

1 典型故障及分析

从多年来电流互感器运行实践经验来看,其常见的故障或缺陷类型主要集中在:绝缘油色谱超标、本体绝缘原因、渗漏油或气体泄漏、发热故障、结构设计原因等方面。这些故障原因既有生产制造厂带来的,也有安装调试过程中造成的,还有很多在运行过程中逐渐产生的。从近年来的故障原因统计看,电流互感器制造质量不良已成为造成事故的主要原因,一些由其它原因造成故障情况中也包含有制造质量问题。

1.1 油中溶解气体含量超标

电流互感器油中溶解气体监测是一种有效地分析判断充油式互感器安全运行状况的措施。引起油中溶解气体含量变化及超标的主要原因多集中在内部问题上。通过分析油中溶解气体的组分和含量,能够判别不同原因引起的缺陷或故障。

某新建变电站 18 台 110 kV 电压等级的电流互感器在新安装验收试验时,油中溶解气体含量合格,由于超过半年未投运,于正式投运前再次试验时,被

测出油中溶解气体的氢含量 $\varphi(\text{H}_2)$ 为 $80 \sim 100 \mu\text{L/L}$, 超过新投运验收标准 $\varphi(\text{H}_2) < 50 \mu\text{L/L}$ 的要求^[1], 其余气体含量均符合标准。由于仅单氢含量超标,分析可能是该批次产品在制造过程中存在某种缺陷。经查该批次互感器出厂试验数据符合标准要求。会同生产厂家综合分析,判断原因出在互感器的不锈钢金属膨胀器上,该批次金属膨胀器在加工过程及焊接时吸附了氢,未经处理及适当存放即安装于互感器上,导致所含氢慢慢释放到油中。经厂家返厂处理后,于现场安装完毕再试验合格。

某投运近 3 年的 LCWB2—220 型电流互感器在预防性试验进行油中溶解气体分析时,测出 $\varphi(\text{C}_2\text{H}_2)$ 值为 $45 \mu\text{L/L}$, $\varphi(\text{C}_2\text{H}_4)$ 值为 $681 \mu\text{L/L}$, $\varphi(\text{总烃})$ 值为 $1854 \mu\text{L/L}$ 。经过仔细检查发现,该互感器头部内的一次连接线与接线板间的螺栓有所松动,引起长期发热产生气体,产生缺陷的原因是制造及装配工艺不良,在采用螺栓连接紧固时未能紧固到位,在现场安装又无法发现该内部隐患。

某站新投运不久的 LB7—220W 型电流互感器,在新投运后的跟踪监测中发现,油中溶解气体 $\varphi(\text{H}_2)$ 达到 $2700 \mu\text{L/L}$, $\varphi(\text{总烃})$ 达到 $197 \mu\text{L/L}$, 超过预防性试验标准 $\varphi(\text{H}_2) < 150 \mu\text{L/L}$, $\varphi(\text{总烃}) < 100 \mu\text{L/L}$ 的要求^[2]。经过检查分析,产生故障的原因是该电流互感器二次接线端子内部有线头松动,在运行过程中脱落放电,导致产生大量故障气体,仍然属于制造及装配质量不佳。

某台 220 kV 电流互感器经过检修后,运行一段

时间进行油中溶解气体分析,测得 $\varphi(\text{H}_2)$ 值为 $823 \mu\text{L/L}$, $\varphi(\text{CH}_4)$ 值为 $124 \mu\text{L/L}$, $\varphi(\text{总烃})$ 值为 $201 \mu\text{L/L}$ 。仔细分析原因为检修后没有采用真空注油,引起内部吸入水份,属于检修质量不良造成隐患。

1.2 本体绝缘问题

电流互感器绝缘受影响因素较多,绝缘材料、受潮、工艺不良、设备老化等都可能致其绝缘性能下降,产生局部放电、油质劣化、局部过热、闪络和击穿等故障。

某站新安装 21 台 110 kV 电流互感器,在做本体介损试验时发现,本体介损值均超标。经查,生产厂家在生产该批互感器时,真空干燥装置出现问题,使得对该批次互感器的干燥不完全,绝缘材料绝缘性能降低,引起本体介损全部超标,同时出厂试验把关不严,使问题产品到达现场。

某地 500 kV 油浸式电流互感器在运行中爆炸,经过解剖分析,发现该产品的一次线圈屏间绝缘的包扎制造工艺不良,对局部绝缘及场强的处理考虑不周,产生局部放电延伸到地屏,导致产生贯穿性放电引起爆炸。

某 220 kV 电流互感器在预防性试验中发现本体介损超标,已超过预防性试验规程介损 $\leq 0.8\%$ 的标准^[2],但电容量无明显变化,介损有逐年递增的趋势。而其绝缘油试验合格且多年数据无明显变化,绝缘电阻也合格。经分析,绝缘电阻及油试验合格,排除进水受潮可能,判断是电容屏受潮,在制造中干燥不彻底,经多年运行后,电容屏内潮气外渗,导致主绝缘整体受潮。

某 110 kV 电流互感器在预试时发现二次端子绝缘电阻测试不合格,经查原因为该互感器的二次端子板为胶木绝缘板,绝缘性能较差,在长期运行中容易受潮。另有一组 110 kV 电流互感器因为其二次端子板引线桩头结构设计不良,经多次拆装引起渗油受潮,降低了绝缘性能,引起介损异常。

1.3 互感器结构设计缺陷

电流互感器结构有正立式、倒立式,其一、二次接线及局部绝缘的设计结构差异比较大。在高电压等级的互感器中,结构设计对互感器安全运行的影响非常大,而设计、制造原因引起的互感器故障比较常见。

SF_6 气体绝缘电流互感器结构比较特殊,其设计、制造工艺要求相当高。某 500 kV SF_6 气体绝缘电流互感器投运后不久发生故障,检查发现,一次绕

组绝缘严重损坏,起因是内部连接螺栓存在选材缺陷,运行中断裂引起局部放电,产生过热并对地击穿。某 500 kV SF_6 气体绝缘电流互感器运行中发生内部闪络,解体发现屏蔽罩、内导电杆、外导电杆和电容均压屏都有烧伤痕迹,电容锥绝缘完全烧黑,末屏接地线烧断,综合分析判断为设计的电容锥场强过高、制造工艺及选材不良造成。

某厂生产的 9 台 220 kV 电流互感器局部放电试验超标,其余试验未见异常,经反复检查分析确定是固定器身的胶木螺杆内部有气泡缺陷,而互感器绝缘结构又不尽合理,局部位置场强较高,处于较高电场位置下的螺杆内部空气击穿产生局部放电,因其处于螺杆内部未对其它试验数据造成影响,属于互感器零部件及材料存在质量缺陷,产品设计结构有隐患,隐蔽性较大,难以发现。

2 故障的防范对策

从电流互感器故障产生原因分析,必须采取措施加强电流互感器的设计、制造质量,对产品的结构设计合理性、材料选取的质量保证、制造工艺的严格控制等方面,都要进行全过程的管理,防止在生产制造过程中留下安全隐患,造成先天不足。

在新设备的安装、调试、验收过程中,必须严格把好“投运关”,加强对安装质量的监督管理,坚持做好验收试验,细致分析试验结果,不放过任何一个细微的疑点,防止将存在制造质量问题的设备或将安装中造成隐患的设备投入运行。

加强电流互感器的运行维护和技术监督工作,严格按照规程规定要求开展预防性试验,尽早发现存在的异常和问题,尽早安排检修或更换,消除安全隐患。从制度上要进一步加强管理手段和方法的完善,理顺专业管理,完善消缺和反事故措施,提高监测手段和检修人员技能,减少管理或人为因素引起的故障。

3 结束语

电流互感器是电网的重要设备之一,认真分析其典型故障和原因,有助于提高其安全运行状况。防范电流互感器故障的综合措施应该包括:提高产品设计、制造工艺水平,保证安装验收质量,加强运行维护和技术监督工作等方面。

(收稿日期: 2008—12—20)

架空输电线路复合绝缘子掉串原因分析及对策

李龙江

(四川省电力公司, 四川 成都 610041)

摘 要:文章收集了四川省电力公司范围内挂网运行复合绝缘子重要掉串事件,对芯棒脆断机理进行了深入分析,提出了早期复合绝缘子由于结构缺陷导致芯棒渗水酸化脆断的结论。并对目前四川复合绝缘子运行中存在的问题进行了分析,对今后如何做好复合绝缘子运行工作提出了建议和意见。

关键词:输电线路;复合绝缘子;掉串;分析;对策

Abstract: The important affairs of composite insulator string dropping in Sichuan Electric Power Corporation (SPEC) are described, the mechanism of brittle fracture of insulator rod is analyzed, and the conclusion is proposed that the acidification and brittle fracture of the early composite insulator rod are caused by water penetration due to structural defects. Furthermore, the problems existing in the composite insulators that are in operation presently in SPEC are analyzed, and the advices and suggestions are proposed for the composite insulator in the future work.

Key words: transmission line; composite insulator; insulator string dropping; analysis; countermeasure

中图分类号: TM216 **文献标识码:** B **文章编号:** 1003—6954(2009)03—0079—03

四川电网从 20 世纪 80 年代以来开始在网内使用复合绝缘子,目前仍然挂网运行的主要是 20 世纪 90 年代末以来的产品,由于早期复合绝缘子的生产工艺相对较为落后,再加上运行时间长,复合绝缘子掉串情况近年呈增多的趋势,220 kV 及以上输电线路复合绝缘子掉串 2005 年发生一起,2007 年发生了两起,2008 年发生一起。复合绝缘子在网内使用量较大,且部分运行时间较长,并缺乏有效的检测手段,绝缘子运行情况很难真实反映,复合绝缘子的掉串很难预防,为了加强复合绝缘子运行维护,充分认识复合绝缘子掉串原因,解决早期复合绝缘子的掉串问题,特对四川省近年来的几起掉串情况进行分析,并结合了国内相应事故情况,查找事故原因,寻找对策,现将分析如下。

1 复合绝缘子使用情况

四川电网从 20 世纪 80 年代末开始在输电线路上使用复合绝缘子,最初是在重污秽地区使用,后来由于复合绝缘子优异的性能而在各种污秽等级的地区广泛的使用。到目前为止四川电网复合绝缘子使用在从 110 kV 到 500 kV 各电压等级的线路上,其中以 110 kV 和 220 kV 线路为主,500 kV 线路由于四川电网本身发展较晚,线路长度相比 110 kV 和 220 kV 线路也较短,复合绝缘子使用数量相对较少,主要在

这几年才开始逐渐在 500 kV 线路上使用。四川电网 110 kV 到 500 kV 线路使用复合绝缘子数量情况及相应生产厂家见表 1。

表 1 四川电网 110~500 kV 线路使用复合绝缘子情况表

电压等级 (kV)	使用数量 (支)	生产厂家
110	29 797	广州迈克林电力有限公司、襄樊国网合成绝缘子股份有限公司、淄博泰光电力器材厂、保定电力修造厂、广州 MPC 国际电工等
220	22 616	
500	1 949	

目前挂网在运的复合绝缘子,最早的是 1996 年东莞高能生产的 110 kV 绝缘子,1997、1998、1999 年产的复合绝缘子大量在电网上使用,共计有 8 570 支,其中 110 kV 有 6 063 支、220 kV 有 2 015 支、500 kV 有 492 支。

2 复合绝缘子掉串事件

2.1 220 kV 东平二线 2005 年掉串事件

2005 年 9 月 14 日 11 时左右,220 kV 东平二线 18 号耐张塔 A 相小号侧一支合成绝缘子发生了断裂故障。断裂点为带电侧碗头后靠近“均压环安装点”的位置。

2.2 220 kV 长代东 2007 年掉串

2007 年 10 月 16 日 00:24,220 kV 长代东 134 号塔中相耐张串复合绝缘子靠近导线侧芯棒断裂,导线

由引流支撑管连接,引流线对塔身距离不够放电,线路跳闸,重合不成功。铁塔塔头有变形,线路停运近 40 小时。

2.3 220 kV 黄孜线 2007 年掉串

2007 年 9 月 26 日,发现 220 kV 黄孜线 53 号塔大号侧中相一串复合绝缘子靠近导线侧芯棒断裂,9 月 27 日对 53 号塔绝缘子全部进行了停电更换。

2.4 500 kV 普洪二线 2008 年掉串

2008 年 8 月 9 日,发现 500 kV 普洪二线 402 号塔 B 相左串复合绝缘子靠近导线侧芯棒断裂,导线侧端头金具与芯棒结合处内部有锈蚀。

2.5 500 kV 邯鄯 III 线、神侯 I 线掉串

2006 年 3 月 16 日邯鄯 III 线复合绝缘子掉串,2006 年 6 月 23 日神侯 I 线复合绝缘子掉串。

3 复合绝缘子断裂原因分析

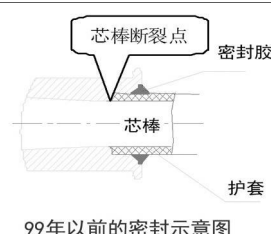
3.1 芯棒脆断面形成的机理

复合绝缘子芯棒采用环氧树脂玻璃纤维挤拉成型,玻璃纤维外表面被环氧树脂粘合着,其中承受负荷的是玻璃纤维,其拉伸强度超过 600 MPa。雨水和潮气在高压电场下极易形成酸性液体,如果复合绝缘子端部密封不良或外护套破坏,酸液就会沿着护套和芯棒界面渗入芯棒内部,从而导致环氧树脂溶胀,直至开裂解体。随着环氧树脂基体的破坏,酸和水介质侵蚀环氧树脂与玻璃纤维粘接面,造成粘接面剥离,使酸和水介质直接接触及玻璃纤维表面,与玻璃纤维中的 CaO 及 MgO 等碱性氧化物接触,这些碱性氧化物与酸液反应,使得碱性氧化物溶解,在玻璃纤维的晶格中形成高应力区,导致微裂纹和玻璃纤维机械性能的下降直至断裂。随着时间的推移,这些酸性液体在电场作用下继续横向缓慢腐蚀周围的环氧树脂和玻璃纤维,逐渐形成完全丧失机械性能的平整脆断面。脆断面不断扩大,芯棒有效面积不断缩小,当脆断面发展到相当比例时,余下的部分承受不住导线的垂直荷载,最终导致脆断。

3.2 断裂原因分析

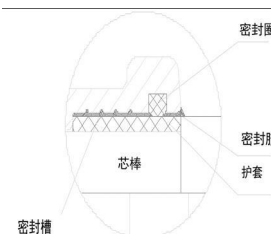
1) 早期绝缘子结构缺陷分析:根据掉串的情况来看,芯棒断裂位置基本为绝缘护套与金具连接处,如图 1 所示。早期绝缘子的端部密封结构如图 1 所示,其密封只有一道关口,即密封胶,密封胶在运行环境中容易老化。再加上原来的端部连接工艺为内楔

式,一旦密封胶老化开裂,雨水很容易沿护套和金具缝隙渗透至芯棒,从而导致芯棒酸化脆断。从断面点来看,断面点基本位于球头金具与芯棒连接面金具内侧约 1 cm 处,断面基本光滑平整,也证明结构缺陷是导致绝缘子掉串的主要原因。



99 年以前的密封示意图

图 1 1999 年以前的密封示意图



2001 年至今的密封示意图

图 2 2001 年至今的密封示意图

2) 绝缘子高压侧由于电场强度大,长时间电晕作用,使得绝缘子端部密封在高电场和电晕作用下破损,雨水进入芯棒与金具连接部位,导致连接处的芯棒酸化,在应力作用下发生脆断。如 500 kV 普洪二线连接处的金具内表面已出现锈蚀,充分说明雨水长时间渗透所致。

3) 由于早期绝缘子的工艺较为落后,一方面芯棒是普通芯棒,耐酸性能较差,一旦雨水渗透,极易发生芯棒酸化脆断。

4) 早期的复合绝缘子均压环设计不合理,均压效果不理想,再加上施工单位对均压环认识不够,存在均压环安装位置弄反的情况,结果不但改善不了电场分布,相反使高压侧电场进一步畸变,场强进一步增强,从而导致端部密封胶老化加速。

5) 新的端部密封工艺分析。新的端部密封工艺彻底解决了由于端部密封不严可能导致的掉串事件,从图 2 可以看出,新的端部密封工艺采用了三道关进行密封处理,第一道仍为密封胶,第二道为密封圈,第三道为密封槽,当密封胶老化失效时,密封圈和密封槽立即发挥作用,由于密封圈和密封槽均处于内部,其受环境影响较小,不易发生老化,故封堵性能较好,所以很难发生雨水渗透到芯棒的情况,从而较好防止了由于雨水渗透导致的掉串,提高了复合绝缘子的使

使用寿命。

换。

4 存在的问题

1)老工艺生产的绝缘子仍大量挂网运行。1997、1998、1999年产的复合绝缘子大量在电网上使用,共计有 8 570支,其中 110 kV有 6 063支、220 kV有 2 015支、500 kV有 492支。

2)对绝缘子的检测手段有限。由于复合绝缘子内部故障的监测手段有限,很难提前发现复合绝缘子的内部故障,特别是复合绝缘子的端部密封试验开展难度较大。

3)在运复合绝缘子的抽检工作难度较大。四川省电力公司已出台复合绝缘子运行规程,但复合绝缘子按规程的抽检工作开展较少,目前没有形成一套完善的抽检机制。

5 复合绝缘子运行维护工作思考

1)安排更换挂网运行的早期复合绝缘子产品。对采用淘汰工艺生产的早期绝缘子逐步安排进行更

2)开展复合绝缘子抽检工作。开展全省复合绝缘子样品抽检工作,特别是端部密封试验。

3)加强对质量可疑厂家运行产品的跟踪监测。四川省在运复合绝缘子生产厂家较多,部分厂家已经倒闭,部分厂家生产能力较小,应加强对此类厂家的产品进行加量抽检,以便及时发现问题。

4)加强在运复合绝缘子单改双工作。对大档距、大高差、重要跨越点、居民区的复合绝缘子实施单改双工作,以避免掉串导致的不良后果。

5)开展红外成像仪检测复合绝缘子研究。根据复合绝缘子出现缺陷后,可能产生热成像图像突变的情况,着手研究红外成像仪检测复合绝缘子。

6)开展在运复合绝缘子运行情况研究与分析。进一步摸清四川省在运复合绝缘子情况,针对不同厂家、不同运行条件、不同运行环境,开展早期复合绝缘子运行情况分析,抽取一定样品开展分析工作,对早期各厂家的复合绝缘子进行全面、正确的评估,特别是要加大对耐张和大档距杆塔复合绝缘子的运行情况研究。

(收稿日期: 2008—12—01)

(上接第 70 页)

(6)完全不受负载影响,消除了测量数据传输过程中的系统误差。数字化的电流电压信号在传输到二次设备和二次设备处理的过程中均不会产生附加误差,提升了保护系统、测量系统和计量系统的系统精度。

(7)简化了二次系统的试验:①一次和二次无直接电联系,不存在 TV 短路, TA 开路问题,提高了现场试验接线安全性;②数字信号替代了传统模拟量输入信号,无需进行模拟量输入准确度校验;③无需校验互感器的极性,无需进行二次回路接线检查;④ 无需回路绝缘电阻测试,回路压降测试,回路接地的检查。

2.5.2 经济效益

(1)常规的综合自动化变电站仍存在复杂的二次回路,控制电缆用量较大,且电压等级越高,控制电缆用量越大。

数字化变电站中大量采用光纤和网线作为信息交换的介质,控制电缆用量将明显降低,体现了一定的经济效益。

(2)全站按照 IEC 61850通信标准构建,体现了国际自动化技术发展最新潮流和理念。基于 IEC 61850构建的自动化系统具有良好的互操作性和长期稳定性,降低了改建、扩建的系统升级、调试成本,保护了用户的投资。

2.5.3 社会效益

(1)电子式互感器的应用解决了传统互感器的饱和、铁磁谐振、绝缘油爆炸、六氟化硫泄漏等问题,体现了环保、节能、以人为本的理念。

(2)控制电缆用量大大减少,降低了有色金属消耗,有利于社会的可持续性发展。

参考文献

[1] 李九虎,郑玉平,古世东,须雷. 电子式互感器在数字化变电站的应用 [J]. 电力系统自动化, 2007(7): 94—98.
[2] 杨奇逊. 变电站综合自动化技术发展趋势 [J]. 电力系统自动化, 1995, (10): 7—9.
[3] 高翔. 数字化变电站应用展望 [J]. 华东电力, 2006, (8) 47—53.

(收稿日期: 2009—01—04)

油纸套管绝缘介质老化诊断分析

白 斌

(德阳电业局, 四川 德阳 618000)

摘 要:分析水分、温度和放电能量 3 种因素对纸纤维素长链及绝缘油碳氢键的影响;对比主绝缘 $\tan\delta$ 测定和油中溶解气体色谱分析两种诊断方法,指出单一诊断方法存在的缺陷,提出采用综合诊断对套管绝缘状态作出精确评价。

关键词:油;纸;老化;诊断

Abstract: The influences of three factors that is moisture content temperature and discharge energy on paper cellulose chain and insulating oil hydrocarbon chain are analyzed. Through comparing $\tan\delta$ determination method of main insulation with chromatographic analysis method of dissolved gas in oil the defects in single diagnostic method are pointed out and the comprehensive diagnosis is suggested to carry out a precise evaluation of the insulating state of the bushing.

Key words: oil paper ageing diagnosis

中图分类号: TM85 **文献标识码:** B **文章编号:** 1003—6954(2009)03—0082—04

绝缘纸和绝缘油组合的油纸绝缘是高压套管主要组成形式。套管体积小,油量少,结构封闭,电场强度高且集中,在电场、热效应、水分等因素长期作用,绝缘发生劣化或老化,降低电气强度,故障持续发展导致绝缘击穿。统计显示套管故障的 67% 发生在油纸介质里^[1],故障为:①外部应力作用、密封绝缘老化造成套管密封损坏,绝缘受潮;②制造过程中绝缘褶皱,造成局部电应力集中使纸放电。因此对油纸老化程度判别,诊断套管绝缘状态,对确保电力变压器安全运行有重要意义。

下面论述油纸套管的老化机理,分析诊断方法,评估油纸的绝缘状态。

1 绝缘介质老化机理

套管绝缘介质主要是绝缘纸和绝缘油。绝缘纸的主要化学组成是纤维素,纤维分子的长链决定绝缘纸的电气性能。绝缘油是芳烃、烷烃及环烷烃等碳氢化合物组成的混合物。介质老化涉及固体绝缘纸的老化和绝缘油的老化;纸老化是纤维素降解,油老化是碳氢化学键的裂解。绝缘纸的老化是不可逆的,且老化程度是影响套管的使用寿命的主要因素;绝缘油的老化可通过更换新油或脱气过滤解决。介质老化过程是多种因素综合作用结果,老化的主要因素为:①水分;②局部过热;③局部放电。

1.1 水 分

纤维素是长链的糖和单糖构成的有机物,并且纤

维素之间有大量孔隙,具有吸气性、吸油性和吸水性。良好的绝缘纸水分含量为 0.1% 左右,对纸老化速度影响可忽略不计;水分含量 0.1% 才对油纸老化产生很大影响。水分在油纸中分布,取决油纸系统的溶解饱和度。溶解饱和度受温度的影响很明显。温度升高时,水分大量迁移到油中;温度降低时,水分大量迁移到纸。

水分对纸的影响为可使纤维素中配糖键断裂,产生自由的糖,使长链分子断裂成短链分子,纤维变弱、缩短,改变纸的结构。纤维纸老化也产生水分;纸中水分的增加,加快纸的老化速度。纸的含水量 0%、1%、2% 和 4% 时 DP 与老化时间关系见图 1^[3],从图 1 中可看出,在 120℃ 时,纸的 $\omega(\text{H}_2\text{O})$ 为 2% 时,老化时间仅 100 天左右,老化率与 $\omega(\text{H}_2\text{O})$ 大致成正比。

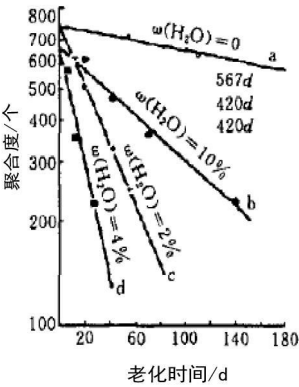


图 1 120℃ 时水分对老化率的影响

水分对绝缘油老化影响微小,只是造成绝缘油劣化,降低绝缘油的电气强度。绝缘油老化是受温度

影响,使油碳键大分子氧化裂解并生成碳类、水、一氧化碳和二氧化碳气体等。

1.2 局部过热

过热引起的油纸老化属于热老化,热老化过程是化学反应。绝缘纸老化与时间和温度关系构成热老化模型: $L=A\exp(B/T)$, 式中: L 为绝缘材料击穿时间; T 为绝对温度; A 、 B 为常数^[4]。击穿时间 L 与温度 T 呈指数关系,即温度对绝缘纸老化速度起主要作用。过热的温度导致纤维链断裂的特性曲线见图 2^[4],从图可看出温度达到 140℃ 以上,纤维链断裂率明显增大;温度大于 200℃ 时,绝缘纸发生热解反应,引起纸纤维素结构链改变,即长链分子断裂成短链分子,造成纸的化学性能劣化,并主要产生 CO、CO₂ 气体和水,CO 和 CO₂ 是由纸纤维焦化所致。

绝缘油是碳氢化合物,由化学键不同的 C—O、C—H 及 H—H 组成,具有不同的键能。温度引起绝缘油烃类碳键断裂或脱氢反应过程需要能量(活化能),使化学键断裂,活化能平均为 50 kcal/mol 左右的绝缘油与温度关系见表 1^[4];从表 1 可看出, >600℃ 时,碳键才能断裂。不同化学键结构的碳氢化合物有不同的热稳定性,油随温度增高使 C—H 键和 C—C 键断裂,生成氢原子和不稳定的碳氢化合物自由基;氢原子或碳氢化合物自由基重新化合,形成大量的氢气和低分子烃类气体和少量的 CO 和 CO₂。生成气体随温度升高出现顺序是烷烃→烯烃→炔烃。

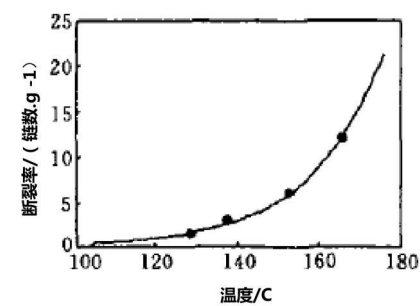


图 2 纤维素链的断裂率与温度之间的关系

表 1 绝缘油的活化能与温度关系

温度(℃)	200~300	400~500	500~600
活化能(kcal/mol)	11	23	54

1.3 局部放电

局部放电引起油纸老化属于电老化,电老化主要受放电能量和放电时间的影响。油纸面长期出现 5~10 pc 的低能量的局部放电^[5],可使油老化。油老化的机理是放电通过离子反应产生离子轰击键能最弱的 C—H 键(338 kJ/mol),促进 C—H 键断裂,重新化合成

氢气。随着放电能量的增强及引起温度的升高,使 C—C 键(607 kJ/mol)、C=C 键(720 kJ/mol)和 C≡C 键(960 kJ/mol)重新化合成烃类气体^[6],使绝缘油成为高碳链 X 物状,失去轴向绝缘能力。油中放电产物会使绝缘纸凝集生成 X 蜡,降低纸的散热能力。

局部放电对纸的侵蚀,造成的局部老化远大于具有自恢复绝缘能力的油。局部放电产生电子和离子等带电粒子冲击绝缘纸,破坏纸的分子结构,导致纤维裂解;带电粒子撞击,使纸局部温度升高,引起纸过热,甚至炭化。

2 诊断技术

2.1 综合诊断必要性

套管的规格、结构、安装环境是多样,诊断必须把握运行状态、环境条件、检修工艺等因素。推定套管使用寿命而进行单一诊断技术是一项重要工作;基于诊断实例,积累单一诊断趋势数据对绝缘老化诊断有较精确的评价。绝缘状况的精确评价与运行状态、故障程度、显示信号的处理和数量、绝缘结构及故障部位有很大相关性,有时单一诊断方法无法诊断出存在的缺陷,为综合诊断提供很好的必要性。

2.2 诊断方法

套管诊断分两类。①局部放电量(PD)、电气特性测定、热图像测定等组成测定诊断;②利用绝缘油气体成分分析等组成化学诊断。

确定诊断项目分为不停电状态下实施带电诊断项目和处在停电状态下进行停电诊断项目。

在故障发展期采用以上方法进行的诊断,都是通过定量地把握绝缘状态,利用分析方法,作出定性地精确诊断。

现场的诊断项目有:主绝缘及末屏对地的绝缘电阻测定(IR)、主绝缘的 $\tan\delta$ (DLF)及电容量测定、油中溶解气体色谱分析(DGA)^[7]。

本节对主绝缘 $\tan\delta$ 测定和油中溶解气体色谱分析两种诊断方法进行分析。

1) 分析主绝缘 $\tan\delta$

油纸介质在交流电压作用下产生电导和极化的过程伴随能量损耗,简称为介质损耗。介质损耗由电导损耗和极化损耗组成。电导损耗是由带电质子或离子迁移从电场中吸收能量产生;极化损耗是由介质在交流电场中存在周期性极化所吸收的电场能量转变为热

能产生。套管绝缘介质发生受潮、局部放电、局部过热或电弧放电等故障,引起绝缘劣化或老化,使电导电流增大,导致电导损耗增加;同时,极化损耗也增加。介质损耗 P 与 $\tan\delta$ 关系为: $P=U^2\omega C\tan\delta$ 式中: U 为电压; C 为电容, $\omega=2\pi f^{[8]}$ 。当 U 、 ω 及 C 一定时,损耗 P 与 $\tan\delta$ 成正比。停电诊断方法分 3 类。①规程法:通过表 2^[9]可对油劣化或油纸老化程度进行初步评价;②趋势法:分析 10 kV 电压时 $\tan\delta$ 趋势数据,能够反映绝缘介质劣化或老化程度,但是存在滞后效应;③ $\tan\delta$ — U 关系曲线法:从随电压升高 $\tan\delta$ 的增加陡度看出纸纤维和油老化程度或油劣化程度,见图 3。

表 2 套管 20℃ 时 $\tan\delta$ 要求值

电压等级 (kV)		20~35	66~110	220~500
大修后	充油型	3.0	1.5	—
	油纸电容型	1.0	1.0	0.8
	充胶型	3.0	2.0	—
	胶纸电容型	2.0	1.5	1.0
	胶纸型	2.5	2.0	—
	充油型	3.5	1.5	—
运行中	油纸电容型	1.0	1.0	0.8
	充胶型	3.5	2.0	—
	胶纸电容型	3.0	1.5	1.0
	胶纸型	3.5	2.0	—

实例 1:表 3 为某座变电站 220 kV 变压器 110 kV 油纸电容型套管 A 相在进行预防性试验的主绝缘 $\tan\delta$ 测定值 (10 kV 试验电压时)。从表 3 可看出, $\tan\delta$ 值低于表 2 要求值;从 $\tan\delta$ 趋势数据看出, 2006 年 3 月 2 日油纸绝缘已存在油劣化、油纸老化或放电, 2006 年 6 月 9 日绝缘油劣化或油纸老化程度加快,表明故障性质严重。

油纸电气性能变化过程对 $\tan\delta$ 影响为:①绝缘油老化生成的杂质受电场作用解离为离子,使绝缘油的电导率大大增加,电导电流增加引起电导损耗增大, $\tan\delta$ 随之增大;②绝缘油的局部放电引起游离损耗产生,使绝缘油温度上升, $\tan\delta$ 也上升。③绝缘纸老化形成局部的“杂质”——纸“分子断链”^[9],增加了偶极子和夹层极化的损耗,引起 $\tan\delta$ 增大。

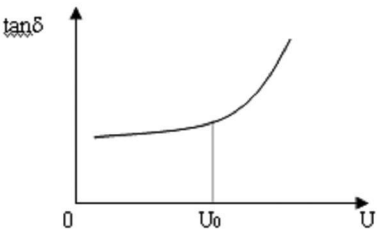


图 3 $\tan\delta$ — U 关系曲线

绝缘油劣化的定性诊断可通过末屏对地的绝缘

电阻、微水含量和油 $\tan\delta$ 判定,油纸老化原因的诊断由气体分析确定。

表 3 110 kV 套管 A 相主绝缘 $\tan\delta$ 及电容量 C

时 间	$\tan\delta(\%)$	$\Delta \tan\delta(\%)$	$C(\text{pf})$
20040421	0.376	—	381.07
20060302	0.651	0.275	379.71
20060609	0.918	0.267	382.30

2) 分析气体

套管内发生过热、放电等故障产生的热量使绝缘油和绝缘纸发生局部热分解,从而产生 H_2 、 CO 、 CO_2 及烃类等气体, CO 和 CO_2 主要是纤维纸老化分解产生,非故障下 CO 和 CO_2 气体含量变化稳定。气体的成分和含量取决于故障类型和故障能量密度。诊断方法为 H_2 、 CH_4 、 C_2H_2 气体达到异常水平时主导气体及三比值法。三比值法在故障性质严重时才采用, CO 和 CO_2 气体含量变化作为辅助诊断方法。主导气体和故障相关情况如下。

- ① H_2 主导型 放电和受潮是主要原因;
- ② CO 、 CO_2 、 C_2H_4 、 CH_4 主导型 由过热引起故障是主要原因;过热主要原因是穿缆线鼻与引线头焊接不良、穿缆引线绝缘纸破损; X 蜡沉淀于绝缘纸等;
- ③ C_2H_2 主导型 放电引起故障是主要原因;放电主要原因是电容芯子卷制缺陷和电容屏设计尺寸不当等。

判断气体异常水平见表 4^[10]。

表 4 套管油中溶解气体浓度注意值 ($\mu\text{l/l}$)

气体	含量
H_2	500
CH_4	100
C_2H_2	2 (110 kV 及以下)
C_2H_4	1 (220~500 kV)

实例 2:某局一台 220 kV 变压器 110 kV 套管 C 相油中溶解气体色谱见表 5^[10]。

表 5 110 kV 套管 C 相油中溶解气体色谱数据 ($\mu\text{l/l}$)

时 间	H_2	CH_4	C_2H_6	C_2H_4	C_2H_2	CO	CO_2
19970806	20.8	19.6	17.6	27.9	0.0	513.6	4422.3
19990406	35.5	25.4	20.1	33.8	0.0	614.2	6048.1
20010408	184.54	135.8	989.2	7401.1	0.0	1564.6	12526.1

从表 5 看出, H_2 和 CH_4 含量超过注意值。 C_2H_2 为 0, H_2 占氢烃总量的 27% 以下,判断为无放电故障。 CH_4 占 H_2 、 CH_4 和 C_2H_2 3 种气体总量的 77.7%,为主导气体 CH_4 ,诊断为过热故障。 CH_4 超过注意值的 40 倍, H_2 超过注意值的 2 倍,故障性质较严重。

故障类型用三比值 (C_2H_2/C_2H_4 , CH_4/H_2 , C_2H_4/C_2H_6) 编码计算为 022, 判断套管存在 $>700\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的严重过热故障; CO 和 CO_2 含量变化大, 且 $CO_2/CO>7$ 为固体绝缘材料—绝缘纸老化所致, 判断为绝缘纸热老化程度严重。故障原因为穿缆引线绝缘纸破损与导电管靠接产生局部过热^[11]。

3) 综合分析

套管存在过热、放电等故障, 导致油纸电气、物理、化学性能的变化, 油纸分解产生气体, 油纸产生电量 (电流和放电量) 增加。气体含量和电量增长与套管绝缘结构、故障能量大小、故障部位、运行和检修等因素有直接联系。电气特性和化学试验对不同故障类型有较高的灵敏性, 由于为单一诊断方法, 不能对绝缘状况作出精确评价, 应将电气特性和化学试验结果进行综合分析。

实例 3: 某座变电站 220 kV 变压器 110 kV 套管 C 相油中溶解气体色谱数据和 10 kV 电压下的主绝缘 $\tan\delta$ 见表 6 和表 7。

表 6 110 kV 套管 C 相油中溶解气体色谱数据 ($\mu\text{l/l}$)

时 间	H_2	CH_4	C_2H_6	C_2H_4	C_2H_2	CO	CO_2
20060609	83.43	13.28	4.84	4.74	0.0	832.87	1713.41

表 7 110 kV 套管 C 相主绝缘 $\tan\delta$ 及电容量 (C)

时 间	$\tan\delta(\%)$	C (pf)
20040421	0.406	381.07
20060302	1.036	379.43
20060609	1.610	382.27

从表 6 化学试验数据显示绝缘良好, 表 7 电气特性试验数据看出绝缘油劣化、油纸老化或放电。两种诊断方法差异受绝缘结构、故障部位、故障程度等因素影响。测试绝缘油的 $\tan\delta$ 和微水含量均合格, 排除绝缘油劣化的因素。套管内部由于制造工艺不良、绝缘设计不当或 X 蜡造成油纸局部过热或局部放电故障, 加快 H_2 和烃类气体的产气量和产气速率。故障部位在电容芯子内部, 故障发展过程为中期阶段。由于 0.8~0.12 mm 厚的绝缘纸卷制十几层形成对气体扩散的阻碍性, 造成纸的透气性差, 致使电容芯子外部绝缘油中溶解气体含量低于注意值, 降低了化学诊断方法的精确性。

绝缘纸过热引起温度上升, 加剧纸分子的热运动, 使偶极子极化损耗增加。局部放电产生带电粒子撞击纸, 引起绝缘纸局部温度上升, 加速绝缘纸热老化; 绝缘纸的体积电阻率随温度升高而减小, 使电流

增加, 损耗增大。绝缘纸的散热性差, 温度积累效应加速故障点的温度上升速率, 电流随之增加, 损耗增大, 加剧绝缘纸的老化循环。油—纸构成的介质损耗取决于油纸性能和数量间的比例, 数量大的绝缘纸老化产生损耗远大于油损耗, 使套管 $\tan\delta$ 随绝缘纸的损耗增加而增大。

3 结 论

- 1) 水分使纸纤维素长链断裂; 纸老化可产生水; 水分增加, 加快了纤维纸的老化速度;
- 2) 水分引起绝缘油劣化; 温度对绝缘油裂解、老化起主要作用;
- 3) 局部放电形成累积效应和局部过热引起绝缘油碳氢断裂和纤维纸的化学反应与物理效应, 致使油纸老化; 长期低能量局部放电也可使油纸老化;
- 4) 套管绝缘状态的监测和诊断采用单一诊断方法存在缺陷, 应用综合诊断分析, 对绝缘结构、运行状态、测定诊断和化学诊断进行相关性分析, 才能对绝缘状态作出精确评价。

参考文献

[1] 操敦奎. 变压器油中气体分析诊断与故障检查 [M]. 中国电力出版社, 2005.

[2] 钟洪璧, 高占邦, 王官正, 王世阁. 电力变压器检修与试验手册 [M]. 中国电力出版社, 2001.

[3] J. MK. MacA lme 张潮海. 糠醛浓度判断变压器绝缘纸寿命的综述 [J]. 高电压技术, 2001, 27(4): 63—64.

[4] 蒋雄伟, 贾志东, 谢恒. 绝缘材料老化寿命模型的研究进展 [J]. 高电压技术, 2000, 26(3): 44—46.

[5] 岳明镜. 新型油纸电容式套管绝缘可靠性研究 [J]. 高电压技术, 2000, 26(2): 71—73.

[6] 孙才新, 陈伟根, 李俭, 等. 电气设备油中气体在线监测与故障诊断技术 [M]. 科学出版社, 2003.

[7] DL/T596—1996. 电力设备预防性试验规程 [S].

[8] 严璋, 朱德恒. 高电压绝缘技术 [M]. 中国电力出版社, 2002.

[9] 周悦, 朱建新. 高压油纸套管的频率响应测量及分析 [J]. 高电压技术, 2006, 32(11): 163—164.

[10] 王惠杰, 冯雪梅, 周义民等. 一起过热性故障的实例分析 [J]. 高电压技术, 2007, 33(3): 180—181.

作者简介:

白 斌 (1971—), 男, 工程师, 现从事绝缘试验.

(收稿日期: 2008—12—12)

C12—8.83/3.82 型汽轮机组负胀差超限 原因分析及处理

任 宏

(四川电力建设二公司, 四川 成都 612051)

摘 要:结合 C12—8.83/3.82 型汽轮机组的具体情况,从胀差测量、热力系统设计、系统运行方式以及运行参数等方面着手,对产生负胀差的原因进行了综合地分析,提出了减小负胀差的解决方案。

关键词:汽轮机;胀差;回热抽汽;汽封漏汽

Abstract: According to the measurement of differential expansion, the design of thermal system, the operational mode of the system and the operational parameters, the causes why the negative differential expansion occurs are analyzed comprehensively and the solutions are put forward to reduce the negative differential expansion.

Key words: steam turbine; differential expansion; regenerative extraction steam; gland packing leakage

中图分类号: TK268 **文献标识码:** B **文章编号:** 1003—6954(2009)03—0086—03

重庆建峰化工厂热电联产工程 2 号机组是由武汉汽轮机厂生产的 C12—8.83/3.82 型高压单缸、冲动、单抽汽凝汽式汽轮机,具有一级调节抽汽和一级非调节抽汽。汽缸由前汽缸、中汽缸、后汽缸三部分组成,并用垂直法兰联接,前汽缸采用耐热合金钢 ZG20CrMo 铸件,水平中分面采用高窄法兰结构,用下猫爪型式支撑在前轴承箱上。中压缸为普通碳钢 ZG230—450 铸件,后汽缸采用 HT250 铸造结构。转子为整锻加套装轮盘结构,整锻转子材料为 30CrMoV,后五级套装轮盘,材料为 35CrMoA 和 34CrNiMo。

转子级数 18 级,其中第一级为双列复速级,其余十七级为压力级。该机组有七段抽汽口,抽汽口的位置分别在第 2、3、5、7、11、13、15 级后。第 2 级后的抽汽为工业调整抽汽,工业中压调整抽汽压力为 3.82 MPa 由中压提板式喷嘴组调节。非调整抽汽压力为 0.98 MPa 在 7 级后抽出,非调整抽汽压力随工况不同在一定范围内变化。

汽轮机热膨胀死点设在后汽缸处,以横向滑销定位于后座架,在前轴承箱和前汽缸有垂直键和纵向滑键,使汽缸向前热膨胀时保持汽轮机中心不变。转子则以推力轴承定位向后膨胀。汽缸与转子的相对膨胀用相对膨胀指示器测量。相对膨胀指示器装在后汽缸上。

该机组在试运期间曾多次出现负胀差超限(厂家规定胀差范围:—1 mm~+3 mm)而停机,后经厂

家同意将负胀差极限值放大到 —1.6 mm,同时还必须密切监视机组的其它参数维持机组运行,严重影响了机组运行的安全性。

在实际运行过程中,该机组的胀差变化的趋势表现为并网带负荷后,胀差逐渐从正值变化为负值,升负荷过程正胀差几乎没有增加,在一定负荷稳定运行一段时间后,负胀差逐渐增加,接近或达到极限值。在减负荷过程中,负胀差也会快速的增加。

1 造成负胀差的原因分析

1.1 转子与汽缸相对膨胀分析

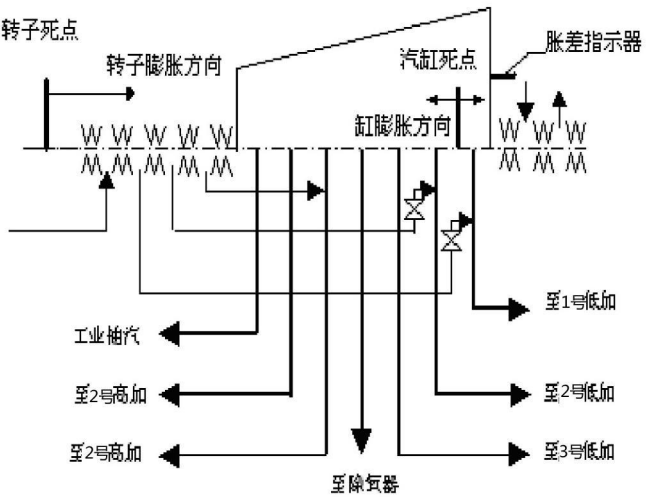


图 1 汽轮机转子和汽缸死点及膨胀方向示意图

转子和汽缸的膨胀死点及膨胀方向如图 1 所示,

转子和汽缸分别以各自的死点为基准膨胀或收缩。相对来说,汽缸的质量大而接触蒸汽的面积小,转子的质量小,而接触蒸汽的面积大;而且由于转子在转动的情况下,蒸汽对转子的放热系数大于蒸汽对汽缸的放热系数,使得转子与汽缸间发生热膨胀差值,这个差值就是胀差。胀差指示器并不能准确地反映各级动静间隙的变化,只能指示测点处的胀差值,该机组胀差指示器主要反映的是低压缸处的胀差值。

1.2 影响胀差的因素

1.2.1 轴封供汽温度影响

在冷态启动前开始向轴封供汽时,由于供汽温度(约 140~180℃)高于转子温度,转子局部受热引起伸长,会出现正胀差。热态启动时,如果轴封供汽温度低于转子温度,转子被冷却收缩,会出现负胀差,为了防止出现过大负胀差,轴封供汽温度可适当提高。

1.2.2 真空影响

在升速和暖机过程中,真空变化会使胀差值改变。当真空降低时,欲保持机组转速或负荷不变,必须加大进汽量,转子中低压部分摩擦鼓风的热量容易被增加的进汽量带走,因而转子被加热的程度减小,胀差减小。此外真空降低,排汽缸温度上升,也会减小胀差。真空提高,变化过程与上述相反,胀差增加。

1.2.3 摩擦鼓风热量的影响

汽轮机转子的摩擦鼓风损失不仅与动叶片长度成正比,而且还与圆周速度三次方成正比。低压转子的摩擦鼓风损失转变成热量,来加热后汽缸,导致后汽缸温度升高,膨胀量增大,胀差减小。这种影响在小流量工况尤为显著。随着流量增加,转速升高,这种影响逐渐减小。当机组带一定负荷后,蒸汽量已能将摩擦鼓风产生的热量完全带走,其对胀差的影响随之消失。

1.2.4 进汽参数的影响

当进汽参数突然发生变化时,首先对转子受热状况发生影响,对汽缸的影响要滞后一段时间,会引起胀差的变化。蒸汽的温升(或温降)速度大,转子与汽缸的温差也大,引起的胀差变化也大。在启停过程中,控制蒸汽的温升(或温降)速度,也可以达到控制胀差的目的。

1.3 负胀差原因分析

机组试运期间,对主蒸汽参数、负荷、凝汽器真空以及轴封供汽温度进行严格控制,并不能彻底改善负胀差超限的问题,排除了上述因素对胀差的影响。因

为该机组为非标机组,无同类型机组作为参考,故将汽缸绝对膨胀量过大特别是后汽缸膨胀过大作为负胀差的主要原因进行了分析。

对试运期间的运行参数与设计值进行对比。

表 1 凝汽工况设计抽汽参数(单位:℃)(注:见参考文献 2)

	工业	一段	二段	三段	四段	五段	六段
	抽汽	抽汽	抽汽	抽汽	抽汽	抽汽	抽汽
12 MW	393	364	331	298	230	158	80

表 2 实际运行抽汽参数(单位:℃)

	工业	一段	二段	三段	四段	五段	六段
	抽汽	抽汽	抽汽	抽汽	抽汽	抽汽	抽汽
8 MW	465	430	322	359	294	209	418
12 MW	476	454	406	369	304	216	427

通过对比,可以看出:每段抽汽口温度均高于设计温度,特别是六段抽汽口温度远远超过设计温度。六段抽汽口温度为什么会高出设计值 300 多度?由图 1 便可以分析出可能是由于前汽封各段漏汽压力(特别是三档漏汽)高于抽汽口压力以至返回汽缸引起的,从而导致汽缸低压部分绝对膨胀量明显增加。

如果轴封漏汽返回汽缸,对转子会产生什么影响呢?由于轴封漏汽量小,相对于通过转子的蒸汽流量,对转子几乎没有什么加热作用,不会导致转子的膨胀量明显增加。转子膨胀基本不变,而后汽缸膨胀量明显增加,这就是机组产生严重负胀差的主要原因。

轴封漏汽特别是三档漏汽返回汽缸的原因可能有两个:一是前轴封间隙在机组热态发生了偏移,造成轴封漏汽量大量增加超过原设计值。二是三档漏汽在一定负荷时其压力和流量均高于此段抽汽压力,不能完全被低加利用,余汽返回汽缸。针对前轴封可能存在的诸多问题,则对前轴封汽封齿方向、前轴封径向和圆周整圈间隙及水平结合面接触等安装情况进行复查,均未发现异常,排除了第一种可能性。现基本确认第二种原因是造成轴封漏汽返回汽缸的主要原因。

造成各抽汽口温度偏高的原因又是什么呢?机组的调节级后温度额定负荷设计值为 409℃,而实际运行 12 MW 负荷调节级后蒸汽温度高达 505℃,调节级后蒸汽温度大幅度高于设计值,调节级后汽缸金属温度基本上与级后蒸汽温度一致。调节级后温度上升对转子和汽缸的影响不完全相同。过热蒸汽经过各级膨胀做功后,最终变为饱和蒸汽,对转子而言,由于换热面积大,蒸汽流量大,转子高温部分向低温

部分传递的热量大部分被蒸汽带走,转子的温度梯度最终应与各级后的蒸汽温度梯度基本一致。对于汽缸而言,蒸汽对汽缸的换热系数应小于蒸汽对转子的换热系数,汽缸与蒸汽的换热面积也相对转子小,即蒸汽对汽缸的冷却作用相对较弱,汽缸自高温部分向低温部分传递的热量较少被蒸汽带走,导致各级汽缸的温度应高于对应的蒸汽温度,汽缸的平均温度高于转子的平均温度,最终的结果是汽缸的绝对膨胀量大于转子的绝对膨胀量,产生负胀差。

2 消除负胀差大的措施

2.1 减小前汽封漏汽对汽缸的加热作用

如果汽封漏汽压力小于或接近抽汽口压力,漏汽就直接被带入加热器而不会返回汽缸,特提出了对漏汽管道进行改造的方案(如图 2)。

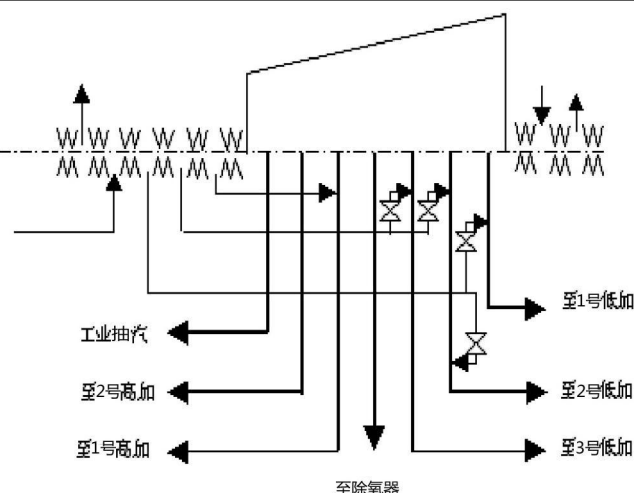


图 2 汽轮机抽汽及轴封漏示意图

- (1)将前汽封原三档漏汽至 6 抽(1号低加)增加一路到 5 抽(2号低加)并安装截止阀;
- (2)将前汽封原二档漏汽至 5 抽(2号低加)另增加一路到 4 抽(3号低加)并安装截止阀。

(3)考虑到原汽封漏汽排放点离抽汽口太近,可将漏汽与抽汽管道汇合点下移。

在运行中改变前汽封漏汽的排放方式,关闭原漏汽至 1 号、2 号低加的截止阀,将三档漏汽排至 5 抽,二档漏汽排至 4 抽。并通过新增的截止阀进行排放量的控制,尽量减少汽封漏汽对汽缸的加热作用。

2.2 提高前轴封汽源温度

该机组原设计轴封供汽的方式为:空负荷采用来自低压减温减压蒸汽(温度约 $180 \sim 250^{\circ}\text{C}$),大负荷采用来自除氧器汽平衡管的饱和蒸汽(温度约 140°C)进入均压箱,由轴封供汽母管分别向前、后轴封供汽,即前、后汽封供汽温度相同。则提出在运行中轴封供汽尽可能采用低减来的蒸汽,保证均压箱的温度在 180°C 左右,因为提高前轴封的供汽温度是减少负胀差的有效方法。

2.3 降低调节级后蒸汽温度

降低调节级后蒸汽温度,可降低调节级后汽缸金属温度,减少汽缸的绝对膨胀量,可有效减少负胀差。由于该机组为非标机组,是在原武汉汽轮机厂 50 MW 抽汽机组改造而来,改造后各级动叶及隔板都发生了很大变化,使调节级做功能力不够,造成焓降不够。汽轮机制造厂应重新计算、设计调节级的工作参数。但改造调节级工作量太大,只有待机组大修时再作处理。

3 结 论

经过对轴封漏汽管道改造和运行优化后,2 号机组负胀差得到了很好的改善,在正常运行中,胀差可维持在 $-0.4 \sim +0.2 \text{ mm}$,未再出现负胀差超限现象,同时机组的热膨胀在 12 MW 稳定时从 15 mm 也降到了 13 mm。

(收稿日期:2008—12—09)

(上接第 19 页)

Communications Circuits and Systems 2008. ICCAS 2008. 25—27 May 2008. Page(s): 48—51.

- [14] Y. S. Zhang D. B. Li Volterra adaptive prediction of multipath fading channel[J]. Electronics Letters 1997, 33(9): 754—755.
- [15] 郭双冰,肖先赐.混沌时间序列的 Volterra 自适应预测滤波器定阶[J].电子与信息学报,2002,24(10): 1334—1340.

- [16] 茅于海,苗家林.自适应预测滤波器的一种新算法[J].电子学报,1983,11(5): 75—81.

作者简介:

罗海洋(1984—),男,硕士研究生,研究方向为电力系统稳定与控制、电力系统调度自动化;

刘天琪(1962—),女,教授,博士生导师,主要研究方向为电力系统分析计算与稳定控制、高压直流输电、调度自动化;

李兴源(1945—),男,教授,博士生导师,主要研究方向为电力系统稳定与控制、高压直流输电、分散式发电。

(收稿日期:2008—12—25)

水电厂球阀前压力钢管连接明段的安全评价

张宏雁¹, 唐 杰², 周 松²

(1 四川电力试验研究院, 四川 成都 610072; 2 四川省电力工业调整试验所, 四川 成都 610016)

摘 要: 自一里电厂压力钢管由于种种原因, 采取了非正常措施进行重新对口, 对该段明管进行了应力实测, 采用有限元方法进行应力分析, 并进行了强度校核, 为压力钢管的安全性评定提供了科学的依据。

关键词: 压力钢管; 有限元分析; 强度校核; 安全性评价

Abstract Due to some reasons the penstock in ZYili Electric Power Station is welded by the abnormal approach. The stress distribution of the unburred penstock is measured in situ, then it is analyzed with finite element method and the strength assessment is carried out. The obtained results provide a scientific foundation for the safety assessment of the penstock.

Key words penstock; finite element method; strength assessment; safety evaluation

中图分类号: TV34 **文献标识码:** B **文章编号:** 1003—6954(2009)03—0089—04

自一里电厂为引水式电厂, 机组海拔 1 545 m, 正常蓄水位海拔为 2 034 m, 最高水位 (全厂甩负荷) 为 2 034 m, 额定水头 447 m, 最高静态水头 474 m, 最高工作水头 560 m (甩负荷时), 钢管直径 1.2 m。引水建筑物由隧洞进水口、圆形压力隧洞、气垫调压室及压力管道组成。压力管道位于引水建筑物的末端, 为地下埋藏结构, 由钢筋混凝土衬砌和钢板衬砌。压力钢管通过连接段明管和球阀及蜗壳连接。蜗壳前明管段直径 1 200 mm, 材料 16 MnR, 公称壁厚 36 mm。

电厂 1 号机组在基建过程中, 由于种种原因, 造成压力引水管和连接管左右错口达 38 mm, 无法正常安装。通过业主、设计及安装单位讨论, 采取非正常措施进行重新对口, 将原管子左右斜向 45° 开 4 条口子, 进行对口后再焊接恢复。由于破坏了原来压力钢管结构, 为保证自一里电厂的安全运行, 防患于未然, 结合自一里电厂压力钢管实际情况和现场条件, 对自一里电厂压力钢管球阀前连接明管进行了安全分析和评价。

明管段原为焊接钢管, 有纵缝一条, 下游侧与发兰盘焊接而成, 如图 1 所示。

而经过现场非正常施工后, 在该段管子上重新开了 4 条 45° 的焊缝, 形成了 2 个喇叭焊口, 与上游环缝

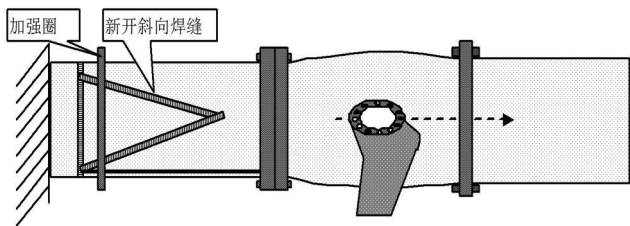


图 2 补焊后明管段结构示意图

形成 4 个新的丁字焊缝, 如图 2 所示。

1 1号球阀进水接管应力实测及分析

1.1 1号球阀进水接管应力实测测点布置

由于在进水接管纵向有四条焊缝, 因此应力实测时将测点主要布置在焊缝附近。一共选取了 10 个测点, 图 3 所示为前 5 个测点, 后 5 个测点在另一面。在每个点处粘贴应变片, 其中应变片 0 方向为进入接管纵向, 具体测点布置和应变花粘贴方式如图 3 所示。在进水接管未冲水前, 将应变片粘贴好并将应变仪调平, 因此实测的应变值为进入接管冲水后的应变增量。

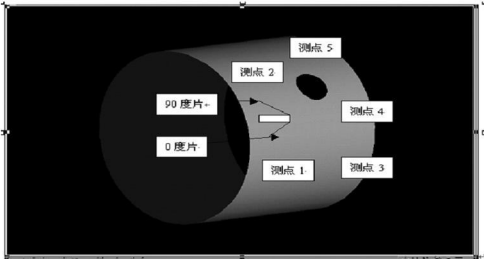


图 3 测点布置和应变片粘贴方向

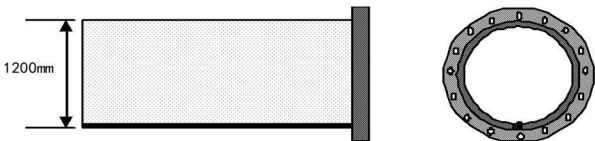


图 1 明管段原结构示意图

1.2 1号球阀进水接管应力实测结果及分析

由于进水接管结构的轴对称性，下面给出的测点 1 三个方向的应变以及相应计算的应力值反映了进水接管的应力状态。表 1 为测点 1 的实测记录。

表 1 测点 1 三个方向的实测应变数据

水压值 (MPa)	0°方向应变 $\epsilon_0 (\mu\epsilon)$	45°方向应变 $\epsilon_{45} (\mu\epsilon)$	90°方向应变 $\epsilon_{90} (\mu\epsilon)$
0.51	163	136	156
0.80	177	140	167
1.10	200	151	182
1.42	220	160	195
1.48	254	243	230
1.56	139	146	123
1.64	185	192	170
1.70	194	199	179

由表 1 的实测应变值计算得到的测点 1 的两个主应力如表 2 所示。

表 2 测点 1 的两个主应力

水压值 (MPa)	σ_1 (MPa)	σ_2 (MPa)
0.51	49.22	41.91
0.80	54.00	44.16
1.10	60.87	48.26
1.42	66.84	51.73
1.48	70.99	67.29
1.56	40.04	34.81
1.64	53.22	48.20
1.70	55.52	51.04

图 4 和图 5 给出了测点 1 的两个主应力随水压力的变化曲线。

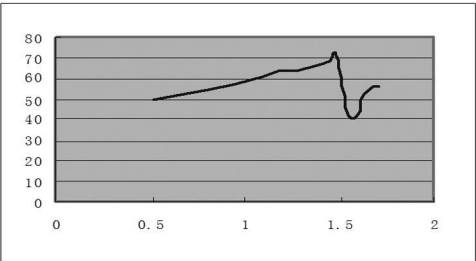


图 4 第一主应力 σ_1 随水压变化的曲线

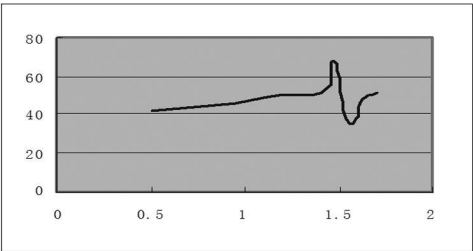


图 5 第二主应力 σ_2 随水压变化的曲线

从图 4 和图 5 可见，在初阶段主应力随水压增大

而增大，近似线性关系。当水压力为 1.48 MPa 时突然下降，然后再增加的现象。这一变化表明，在初始时期，整个进水管并未被完全充满水，这时进水管的应力是由于水压产生的弯曲应力和剪应力，但应力水平不高，只有 70 MPa。当整个进入管充满水后，进水管相当于受内压的园筒，这时进水管只受水的自重作用产生弯曲应力，因此应力有突然减小的现象。随着水压力的增大，内压力产生的应力效应就会越来越大，从而使主应力随水压力增大而再次增大。

2 1号球阀进水接管应力分析的计算仿真

2.1 1号球阀进水接管整体有限元分析

如图 6 至图 8 所示为进水接管整体计算采用板单元离散时的模型和计算结果图。图 9 到图 10 为进水接管整体计算时用三维实体单元离散的模型和计算结果图。从 Von Mises 等效应力分布可见，进水接管大部分区域的应力值在 80~100 MPa，而开孔附近的局部区域存在较大应力，达到 300 MPa，因此开孔处应有相应措施补强。

2.2 进水接管左右两块产生水平位移 34 mm 的有限元计算

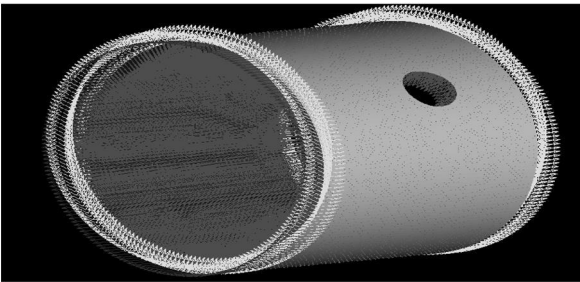


图 6 板单元离散时的有限元模型图

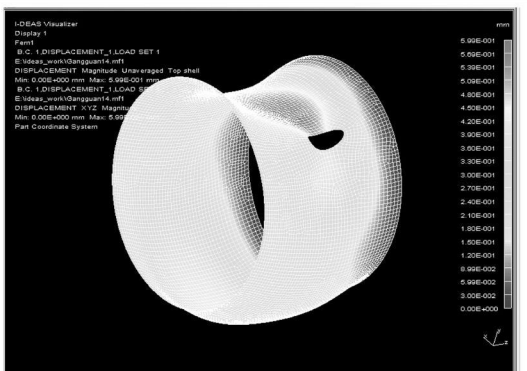


图 7 板单元离散时的整体变形图

如图 11 至图 12 所示为进水接管水平块采用板

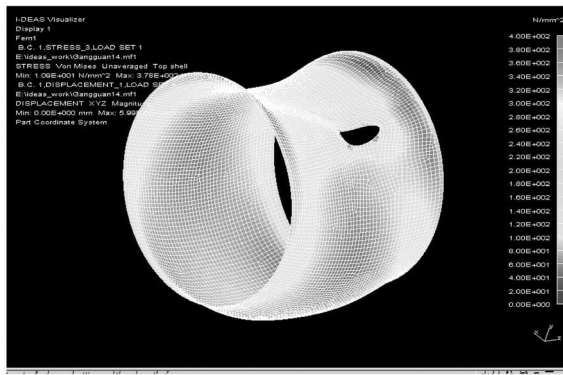


图 8 板单元离散时的 Von Mises 等效应力分布图

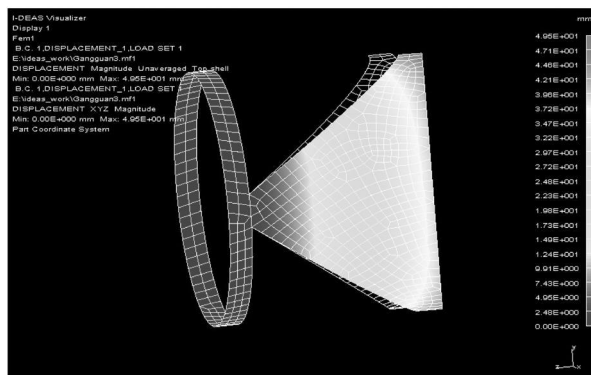


图 11 集中力作用时水平块的中部产生 34 mm 水平位移时整块的变形图

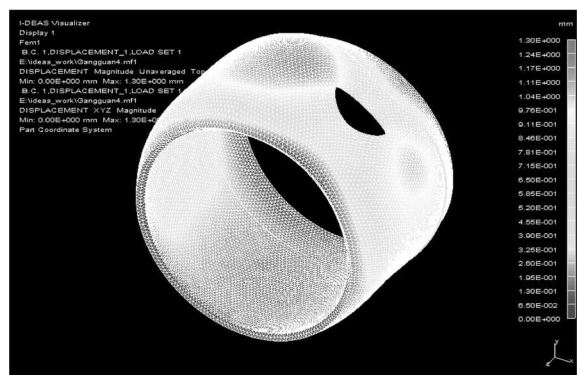


图 9 实体单元离散时的整体变形图

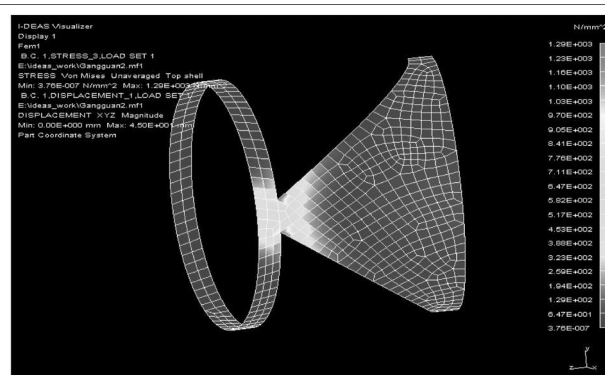


图 12 集中力作用时水平块的 Von Mises 等效应力分布图



图 10 实体单元离散时的 Von Mises 等效应力分布图

单元离散并作用集中力时的模型和计算结果图。图 13 到图 14 为进水接管水平块采用板单元离散并作用均布力时的模型和计算结果图。

从图 11 和图 14 的等效应力分布图可见,使水平块在进水端产生 34 mm 的水平位移是其根部应力高达 1 500 MPa 远远超材料的屈服极限而进入塑性变形。因此焊接后不采取退火等措施消除残余应力,则在水平块靠近进水阀一端将产生很大的残余应力,而使进水管不安全。

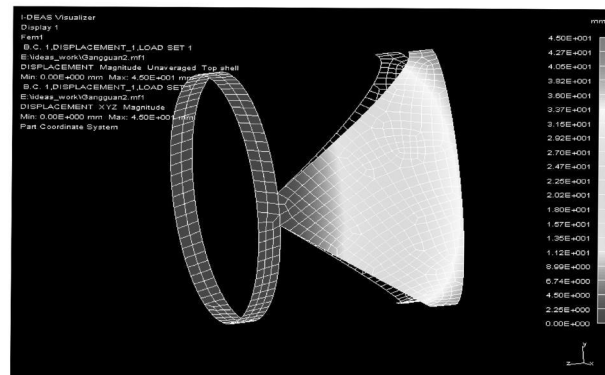


图 13 均布力作用时水平块的整体变形图

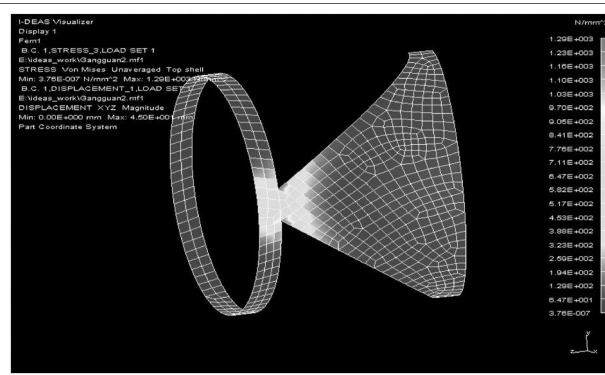


图 14 均布力作用时水平块的 Von Mises 等效应力分布图

3 强度校核及安全性评价

对于压力钢管,主要承受内水压力。明管段最小允许壁厚为:

$$\text{最小允许壁厚 } \delta = \frac{PD_i}{2[\sigma]\Phi - P}$$

因为明管段设计壁厚为 36 mm,直径 1 200 mm,按 SD 144《水电厂压力钢管设计规范》,允许应力 $[\sigma]$ 为 163 MPa 焊缝系数 0.85,考虑腐蚀及磨损裕度 2 mm,实际最小需要壁厚为 $\delta+2$ mm。根据计算可知,明管段压力钢管实际最小需要壁厚为 27 mm。

而实际检查发现连接段最小壁厚 38.1 mm,和它连接的上游直管最小壁厚为 36.4 mm,连接缝最大错边量为 10 mm,连接处最小有效壁厚为 26.4 mm,不能满足要求,因此需要处理后才能保证运行的安全。

4 结论及建议

前面对焊接好后的 1 号机组球阀进水接管,在假设无初应力的条件下、水压力为 6 MPa 时,进行了整体有限元计算。计算结果表明,1 号机组球阀进水接管大部分区域内应力水平为 80 到 90 MPa 而 1 号机组球阀进水接管所用材料 16 MnR 的许用应力为 163 MPa 因此若 1 号机组球阀进水接管无初应力,则 1 号机组球阀进水接管是安全的。

然而,现场施工时,是将 1 号机组球阀进水接管

剖分为四部分,对水平两块施加推力使最外端产生了 34 mm 的水平位移。在不加热的情况下,有限元计算结果表明,该两块根部应力高达 1 500 MPa,因此,如果现场施工后不退火(即使在焊接时采取了预热措施),则会产生很大的残余应力,使 1 号机组球阀进水接管不安全。

1 号机组球阀进水接管最小需要壁厚为 27 mm,而连接处最小有效壁厚为 26.4 mm,不能满足要求,需要处理后才能保证运行的安全。

鉴于上述原因,建议:

①钢管对接焊缝按 DL 5017《压力钢管制造安装及验收规范》要求,在安装时严禁强力拼装,这方面应加强监督,严格控制安装质量。

②焊缝对接错边量严重超标的缺陷,应采取相应措施进行处理。

③在对 1 号机组球阀进水接管剖分部分水平两块现场施焊后必须进行退火处理,以消除根部残余应力,保证 1 号机组球阀进水接管的安全。

参考文献

- [1] SD 144—1985,水电站压力钢管设计规范[S].
 - [2] DL 5017—1993,压力钢管制造安装及验收规范[S].
- (收稿日期:2009—02—11)

(上接第 72 页)主站完成考核、查询、统计等功能。

3 结 论

从电力企业线路巡视业务的现状入手,分析了线路巡视信息化管理的需求,提出并实现了一种基于移动数据库技术的 GPS 电力线路巡视管理系统。系统运行效果表明以移动数据库技术结合移动终端与 GPS 定位技术的巡线管理系统能够适应标准化巡线管理的要求,能够极大提高巡线工作效率和电力企业的生产管理水平。

参考文献

- [1] 胡虚怀,郑若忠.移动数据库及其关键技术[M].计算机系统应用,2000.
- [2] 姚敏锋,张晶.嵌入式移动数据库的应用研究.电脑与信息技术[J],2007,15(5):27—30.

- [3] 刘远东.嵌入式移动数据库及其应用[J].深圳信息职业技术学院,2003,(1):31—34.
- [4] 林高德,周书民.嵌入式移动数据库的关键技术[M].现代计算机,2006.
- [5] 龚春红,金敏.移动数据库关键技术与分析[J].科学技术与工程,2007,7(9):1911—1915.
- [6] 黄聪明. Pocket PC 数据库应用程序设计[M].北京,清华大学出版社,2002.
- [7] 涂小朋,汪林林.分布式空间数据库中基于事务的客户端高速缓存技术研究[J].计算机科学,2004.
- [8] 邹和东,邱吉福.电力企业用电检查管理模式的研究与探讨[M].中国电力教育,2007,243—244.
- [9] 周毓林,宁杨,陆贵强,付林林. Windows CE .NET 内核定制及应用开发[M].电子工业出版社,2005.2.

作者简介:

熊 勇(1974—),男,四川仁寿人,1998年毕业于哈尔滨理工大学高电压技术及设备专业,工程师,从事安全生产技术管理工作。

(收稿日期:2009—03—07)

600 MW 氢冷发电机漏氢处理及预防措施

袁 廷

(四川广安发电有限责任公司, 四川 广安 638000)

摘 要:广安发电有限公司 600 MW 发电机在投运初期运行中曾多次发生过严重漏氢。发电厂在不同漏氢部位有针对性地采取了一系列改进措施,取得了较好效果,有效地减少了发电机运行中的漏氢,使机组漏氢量控制在 $10\text{ m}^3/\text{d}$ 内。

关键词:发电机组;氢气冷却;漏氢;措施

Abstract: There were several times of serious hydrogen leakage in the initial stage of 600 MW generator putting into operation in Guang'an Power Generation Co., Ltd. A series of improvement measures are adopted aiming at the place of hydrogen leakage, which has achieved good results that the hydrogen leakage during the operation of generator has been reduced effectively and the amount of hydrogen leakage has been controlled within $10^3\text{ m}^3/\text{d}$.

Key words: generator set; hydrogen cooling; hydrogen leakage; measure

中图分类号: TM307 **文献标识码:** B **文章编号:** 1003—6954(2009)03—0093—02

广安发电机有限责任公司第 3 期共有 2 台 600 MW 汽轮发电机。型号为 DH—600—G,额定功率为 600 MW,冷却方式为水氢氢,额定工作氢压为 0.414 MPa 是东方电机股份有限公司 2006 年 7 月和 2007 年 4 月的产品。发电机基本结构为机座设计为三段式结构及一个中段和两个端罩组成发电机本体。氢气(油)密封方式为单流环式油密封,密封油压大于氢压为 $0.056\pm0.02\text{ MPa}$ 密封回油量为 $180\text{ L}/\text{min}$ 发电机与端盖之间采用注入密封胶的方式进行密封。氢气冷却器立式放在发电机机座的四角,制造厂规定

运行时漏氢量为 $13\sim19\text{ m}^3/\text{d}$

1 发电机漏氢情况

2 台发电机分别自 2006 年 12 月和 2007 年 6 月投运以来,均发生过不同程度的漏氢,特别是在 2007 年 6 月至 2008 年 1 月期间,2 台发电机运行中出现频繁漏氢,严重漏氢就有 10 次。有的机组多次反复发生,已严重威胁到机组的安全运行,漏氢及处理情况如表 1 所示。

表 1 漏氢及处理情况表

设备名称	日 期	漏 氢 位 置	漏氢量 (m^3/d)		备 注
			处理前	处理后	
6号发电机	2007—06	定子励端右侧机壳机脚板位置 3 个螺丝孔顶部。	50	35	168 h 试运期间
6号发电机	2007—06	定子机壳右侧汽、励两端,加强筋焊缝。	35	19	168 h 试运期间
6号发电机	2007—09—04	定子机壳焊缝处理。	25	10	停机消缺
6号发电机	2007—10—02	汽端轴承外盖、励端上下端盖接合面和上端盖 30° 角处。	50	40	机组运行
6号发电机	2007—10—04	汽、励两端上下端盖接合面和励端上端盖 30° 角处。	50	10	机组运行
6号发电机	2007—10—28	励端左侧氢气冷却器底部密封面。	10 kPa/h		机组运行
6号发电机	2007—12—04	励端左侧氢气冷却器底部密封面。	10 kPa/h	9	机组运行
6号发电机	2008—01—17	励端右侧氢气冷却器底部密封面, 8 号轴瓦。	5 kPa/h	该处不漏	机组备用, 机内压力 0.25 MPa
5号发电机	2007—10—24	汽端右侧上下端盖接合面。	20	10	机组运行
5号发电机	2007—10—26	励端右侧氢气冷却器下端密封面。	2 kPa/h	10	机组运行

2 漏氢处理方法和预防措施

为了解决发电机漏氢,在发电机大修、小修消缺的同时,多次对发电机的漏氢部位进行分析研究,发现漏氢点一般都在设备的接合面处,如发电机端盖与本体接合面、上下端盖的水平接合面、密封瓦的密封座环、中间过渡环与端盖接合面、氢气冷却器底部与发电机本体接合的密封框压板处。为了减少发电机漏氢,针对机组在不同状态和漏氢位置,采取不同的处理方法和预防措施。

2.1 发电机本体机壳焊缝漏氢处理

由于制造厂制造质量原因,6号发电机在2007年6月168 h试运期间,发电机励侧右边定子机壳与机脚板接合面处3个固定螺丝的螺丝孔顶部,发电机汽轮机端机脚板与机壳接合面之间大量漏氢,励端尤为严重。对螺丝孔加装堵头和在发电机本体机壳与机脚板安装接合面之间注胶进行处理后,漏氢还是较为严重,运行一段时间后,发电机漏氢量还在不断增加。在机组停运消缺时,采用下列方式进行查漏和处理。

2.1.1 漏气点查找

因发电机漏气点在机脚板嵌装面之间的机壳加强筋的内侧焊缝上,漏气点位置特殊,如按常规向发电机内充入气体后在机壳外部查漏,就无法确定漏气点的确切位置。因此改为从发电机机壳外面进气在发电机定子本体内部进行查漏。将氢气冷却器吊出,发电机端盖不拆开,在发电机机脚板上打的临时注胶孔上扩孔,并在该位置下方打一个排胶孔,从机脚板向发电机机壳接触面内充入压缩空气,压力 $\leq 0.6 \text{ MPa}$ 。在发电机定子机壳内侧相对应位置加强筋和焊缝处进行查漏,发现汽轮机端发电机定子机壳内右侧上方一条加强筋的中间及向励侧方向端头焊缝各有1个漏气点,励侧方向的1个点漏气较大,下方一条加强筋向励侧端头死角位置整条焊缝有多个漏点,漏气量特别大。

励端发电机机壳内,整条加强筋焊缝未发现漏气,原因是试运期间该位置漏气严重,用端盖密封胶对发电机机壳与机脚板接合面之间进行过注胶堵漏。在查漏前进行排胶处理的同时,可能把漏气点堵塞了,所以该位置未能发现漏气点,在停机前对该位置检查,漏气量比较大。

在发电机定子机壳内,对有螺丝孔加强筋板和全

部焊缝的焊口进行外观和金相着色检查,发现加强筋焊缝的焊口多处有气孔、夹渣、咬边等现象,特别是4个死角处。

2.1.2 漏气点处理

漏气点用手提砂轮或磨光机等工具进行挖削打磨后,用电焊进行补焊,然后再用16~20号槽钢、 $\delta 10 \text{ mm}$ 钢板对补焊位置的整条焊缝覆盖后进行封焊。对漏气点位置较窄且经多次补焊效果不好的也采用钢板进行封焊。对发电机机壳内侧加强筋和焊缝漏气点位置不明确的,用16号、20号槽钢和 $\delta 10 \text{ mm}$ 钢板全部覆盖后进行封焊。

焊接工艺要求:①焊接面除漆除锈。②电焊条在使用前应烘焙除潮,焊接采用直流电焊机,电焊条型号为J507,发电机机壳材料为A3钢。③焊接时应事先在焊接工件四方点焊再在中间点焊,然后才能进行焊接,采用交叉焊接法,每次焊接长度不超过100 mm,防止变形和应力过大。④为防止变形和应力集中以及过大,焊接后应用石棉布进行保温。

焊接质量标准:①焊缝应无裂纹、气孔、夹渣等缺陷,焊缝表面均匀。②焊接完毕后,进行金相作色检查。③对每个焊件(堵板)进行单个气密试验,试验压力 $\leq 0.5 \text{ MPa}$ 检查应无泄漏情况。

经上述处理后,发电机漏氢量由处理前 $25 \text{ m}^3/\text{d}$ 降至合格范围 $10 \text{ m}^3/\text{d}$ 。处理后发电机气密试验虽然合格,但因发电机端盖未拆开,汽轮机端有一个特别狭小位置不好接焊,汽轮机端机壳与基脚板接合面处仍有轻微漏气。

2.2 发电机端盖漏氢处理

发电机本体与端盖、端盖与密封座环、过渡环之间的密封,是采用注入美国产TTTESSAL Part No T20-75密封胶的方式进行密封。发电机运行时受热不平衡膨胀、振动以及检修安装质量等原因,多次造成这些接合面漏油漏氢,发电机润滑油及密封油系统氢含量大,运行中多次进行过补胶处理后,在较短的时间内又重复发生漏氢。

发电机端盖漏氢主要是密封胶泄漏造成密封槽内胶液压力下降在端盖上方形成空洞造成的。如果只利用原来安装在发电机端盖水平接合面的两个注胶嘴进行补胶,对端盖水平面接合漏氢处理有较好效果,而对垂直面的漏氢处理由于不容易排出端盖上方密封槽气体基本无效果。为此在端盖垂直面漏氢时采取先将机组负荷降低后,把氢压降到 0.25 MPa 以

下,将端盖上方的堵头螺丝更换成注胶嘴排气后进行注胶。在上下端盖接合面漏油漏氢时,在水平接合面注胶嘴处进行注胶处理,从而有效解决运行中端盖漏氢问题。注意运行中对端盖上的堵头螺丝更换时,应先将堵头螺丝旋松放气,降低密封槽内的气体压力,防止拆出堵头螺丝时因压力过大造成堵头螺丝冲出。

在端盖检修后,由制造厂要求的在端盖上方注胶,改为由端盖下方注胶。方法为打开端盖水平接合面和上方注胶孔,在端盖下方注入密封胶,使密封槽内的气体能顺利排出,依密封胶出现的顺序装上注胶嘴和堵头螺丝。最后再分别从端盖水平线接合面注胶,直到两边加压密封胶注不进为止。这就防止了发电机密封槽内密封胶的气泡产生和密封胶压力过小及胶量过少,而造成发电机运行不久后出现漏氢。

发电机端盖密封座环、过渡环接合面之间漏氢,运行中无法处理,只能采用一些临时处理方法,费时且效果也不好。因此在检修过程中加强端盖、密封座环、过渡环装配质量,在密封槽两侧及接触面连续均匀薄薄地涂一层可新赛平面密封胶,特别是励端过渡环绝缘、环氧玻璃布板的上下合缝处应涂密封胶。涂密封胶时应小心,不要造成密封槽堵塞,从而造成该处漏氢。

2.3 润滑及密封油系统管道内含氢量大的处理

在运行期间发电机轴瓦及润滑油和密封回油系统漏氢处理进程中,多次发现在补胶后漏氢量减小,不久后含氢量又增大,为此将发电机油氢压差由 0.07 MPa 降至 0.055 MPa 有效减小端盖密封座环、过渡环处有漏胶时油系统漏气,能使漏氢量减少 $5\text{ m}^3/\text{d}$ 左右。

2.4 氢气冷却器底部漏氢处理

因氢气冷却器是立式安装的,冷却器底部的密封和固定,是靠与发电机本体之间的 $10\times 10\text{ mm}$ 方形密封橡胶条的两个垂直面、钢压条及压板固定和密封。运行时受到热胀冷缩和振动的影响,容易发生漏氢。在每次对密封面进行处理时,都发现密封压板上的螺丝是松动的,对螺丝进行紧固后,漏氢量都明显减少或消除,但处理后不久该处又出现漏氢。

2.4.1 加强氢气冷却器底部固定

由于冷却器底部密封 $10\times 10\text{ mm}$ 方形密封橡胶条的两个垂直密封面较小、工作地方又窄,装配困难,运行中多次出现漏氢。为了防止密封面漏氢,针对原

冷却器底部密封结构的缺陷,作了如下改进:

在密封压框上的压紧螺丝上增加了一个弹簧垫圈,防止密封橡胶条变形造成螺丝松动,并在冷却器四个边的密封压框中间对称位置安装 4 个防止冷却器振动位移的定位支撑块。经过改进处理后,消除了运行中振动、密封面减弱造成的漏氢。

2.4.2 提高检修质量

在氢气冷却器装复前,先将氢气冷却器底部密封部位的上下两层方形钢压条校直后,在冷却器和发电机嵌装面进行试装配,使方形钢压条与该接合面平直,以保证密封胶条在安装后能受力均匀、密封良好。氢气冷却器吊入发电机时不要落到位应留有 $2\sim 3\text{ mm}$ 间隙,再用防止冷却器振动位移的定位支撑块,调整方形钢压条与发电机本体接合面之间间隙,钢压条四周两边间隙控制在 0.5 mm ,方形密封胶条装配时,涂抹平面密封胶(587密封胶),避免该接合面因安装不良而漏氢。

2.4.3 防止氢气冷却器和进出水母管路运行中的振动措施

氢气冷却器投入运行前对冷却器和管路注水排净其内空气,运行时调整控制好氢气冷却器进出水流量,压力应均衡且不宜过大,防止因冷却水中含有空气和机座受热不平衡膨胀在运行中产生振动。停机时,应关闭氢气冷却器进出水阀门,防止因启停其他设备时在管路内产生负压造成冷却器进出水管振动。因在 6 号发电机停机备用期间,就发生过因氢气冷却器进出水管振动过大,造成发电机励端右侧冷却器底部密封框压板螺丝松动,漏氢严重。

对进出水母管固定支架与冷却器连接法兰距离较远的水管,在靠近冷却器的进出水母管处加装固定支架,防止进出水母管振动位移产生的拉力对冷却器的影响,避免了冷却器密封面时好时坏。

3 结束语

经过上述处理后,发电机整体气密试验(氢运行)检查,漏氢量都明显减少,漏氢量控制在 $10\text{ m}^3/\text{d}$ 以下,满足运行要求。

(收稿日期:2008—12—15)

抢修二台山变电站

二台山变电站位于5·12大地震震中映秀镇，变电站距离断裂带仅200米。被地震彻底震毁。

为了在2009年5月12日以前恢复二台山变电站，抢建任务急难险重，二台山变电站从可行性论证设计到抢建投运，只用了短短几个月时间，是四川灾后重建的一个奇迹。映秀220千伏二台山变电站工程是四川灾后重建的重点项目，四川电力试验研究院高电压技术中心和电能计量中心的科技工作者先后六次进入现场进行特殊项目试验和互感器试验。最后，二台山变电站在预定的时间期限内成功投运，它既昭示了国家电网坚定的意志与强大的力量，更给灾区群众带来新的希望和信心，为灾区的恢复重建，起到了重要的作用。

二台山变电站全景



四川电力试验研究院高电压技术中心在对设备进行调试



四川电力试验研究院计量中心人员在现场进行实验准备



二台山变电站施工现场